



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

99–24

На правах рукописи

Качанов Василий Александрович

**ПРЕЦИЗИОННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ
И АДРОННАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ
В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

01.04.23 – физика высоких энергий

Д и с с е р т а ц и я
в виде научного доклада
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Протвино 1999

УДК 539.1.07

Диссертация выполнена в Государственном научном центре РФ “Институт физики высоких энергий” (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Н.А. Русакович, доктор физико-математических наук В.Н. Болотов, доктор физико-математических наук А.М. Зайцев.

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета (г. Москва) .

Защита диссертации состоится “_____” 1999 г. в
_____ часов на заседании диссертационного совета Д034.02.01 при Институте
физики высоких энергий по адресу: 142284, Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Диссертация разослана “_____” 1999 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д034.02.01 Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1999

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В восьмидесятых годах были приняты проекты создания ускорительно-накопительных комплексов - SSC, УНК, LHC. Планировавшиеся на них эксперименты поставили задачу поиска новых подходов и технологий для создания электромагнитных и адронных калориметров, способных работать в условиях значительной радиации, регистрировать одновременно большое число частиц и с высокой точностью определять их энергии и координаты. В частности, создание таких калориметров потребовалось для проекта НЕПТУН на УНК. Аналогичные проблемы возникли несколько позже и при постановке экспериментов РАМПЕКС на У-70 и WA-94 в CERN.

Участие ИФВЭ в подготовке экспериментов на LHC потребовало активного поиска новых решений при создании электромагнитных калориметров для экспериментов ALICE и CMS.

Целью диссертационной работы является разработка и создание нового поколения прецизионных электромагнитных и адронных калориметров для экспериментов на фиксированных мишенях и коллайдерах.

Научная новизна и практическая ценность.

Впервые в мире был исследован ряд тяжёлых монокристаллов как потенциальных кандидатов для прецизионной электромагнитной калориметрии. На их основе были созданы и изучены в пучках частиц ускорителей ИФВЭ и CERN прототипы гамма-спектрометров. Результаты исследований прототипа калориметра на базе кристалла вольфрамата свинца PbWO₄ стали определяющими при выборе электромагнитных калориметров для экспериментов на LHC- ALICE и CMS.

Разработан и создан модульный свинцовый компенсированный адронный калориметр, являющийся на сегодня крупнейшим (170 тонн) в мире детектором подобного типа. 54 модуля этого калориметра входили в состав установки по поиску кварк-глюонной плазмы в CERN (эксперимент WA-94). Калориметр, состоящий из 220 модулей, используется в эксперименте РАМПЕКС на ускорителе У-70 ИФВЭ, где играет основную роль при организации триггера для изучения поляризационных процессов в pp-взаимодействиях и измерении энергии адронов.

Разработан и внедрён в производство импульсный источник света на базе сцинтиллирующего кристалла $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$, который широко применяется во многих экспериментах как в России, так и за рубежом (РАМПЕКС, ИФВЭ; WA-94, CERN; E787, BNL; KEK) для мониторирования и калибровки электромагнитных и адронных калориметров.

Автор защищает

1. Разработку и создание прецизионных электромагнитных калориметров на базе тяжёлых монокристаллов:
 - сцинтиллирующего кристалла PbWO_4 (PWO),
 - черенковских радиаторов $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) и $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ (NBW).
2. Разработку и исследование мелкоячеистого электромагнитного калориметра на базе сандвича вольфрам-сцинтиллятор, обладающего высокими пространственным и координатным разрешениями.
3. Разработку и создание компенсированного свинцового адронного калориметра нового поколения для работы в пучках адронов и ионов с полной энергией более 3 ТэВ.
4. Разработку и создание реперных импульсных световых источников, предназначенных для калибровки спектрометров и электроники.

Сообщения и публикации по теме диссертации. Работы, составляющие основное содержание диссертации, опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях и в виде препринтов ИФВЭ, в журналах “Приборы и техника эксперимента”, “Nuclear Instruments and Methods”, в препринтах CERN, LAPP (Annecy, France) и KEK (Japan), в трудах международных конференций [1–17]. Результаты работ докладывались на научных семинарах ИФВЭ, CERN и LAPP, на Международной конференции CRYSTALL 2000 в Шамони (Франция, 1992 г.), на IV Международной конференции по калориметрии в физике высоких энергий на о. Эльба (Италия, 1993 г.), на Международном симпозиуме IEEE’93 в Сан-Франциско (США, 1993 г.).

На разработанные для мониторирования калориметров источники света на основе кристалла $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ получено авторское свидетельство на изобретение №1826763.

Структура диссертации. Диссертация в виде научного доклада изложена на 35 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 36 рисунков, 3 таблицы и список литературы, включающий 17 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

В конце 80-х годов возникла необходимость создания нового поколения калориметров как электромагнитных, так и адронных, для экспериментов на планируемых тогда новых ускорительных комплексах: SSC, УНК, LHC.

Для исследования поляризационных процессов на струйной поляризованной мишени, расположенной в подземном зале УНК (эксперимент НЕПТУН), потребовалась разработка и создание нового поколения детекторов, способных работать в условиях высоких радиационных полей, одновременно регистрирующих

большое количество γ -квантов и электронов и с высокой точностью определяющих их энергию и координаты. Широко известные в то время спектрометры типа ГАМС не отвечали требованиям эксперимента прежде всего из-за плохой радиационной стойкости свинцового стекла и недостаточной длины радиатора (ГАМС-4000, стекло Ф8 – 15 радиационных длин; ГАМС-2000, стекло ТФ1 – 17 радиационных длин).

В процессе подготовки экспериментов НЕПТУН и позже РАМПЕКС были разработаны и исследованы на пучках частиц следующие прототипы спектрометров:

Электромагнитные калориметры:

- Слоистого типа (сандвичи):
 - свинец-сцинтиллятор с размером ячейки $38 \times 38 \text{ мм}^2$,
 - свинец-сцинтиллятор с размером ячейки $76 \times 76 \text{ мм}^2$,
 - вольфрам-сцинтиллятор с размерами ячейки $19 \times 19 \text{ мм}^2$.
- Спагетти - калориметры:
 - свинец-сцинтиллирующие волокна диаметром 1 мм и 0,5 мм,
 - вольфрам-сцинтиллирующие волокна диаметром 0,5 мм.
- Спектрометры на тяжёлых кристаллах:
 - сцинтиллирующий кристалл PWO,
 - черенковские радиаторы GGG и NBW.

Адронный компенсированный свинцовый калориметр:

- размер ячейки $100 \times 100 \text{ мм}^2$, 6,5 ядерных длин,
- размер ячейки $100 \times 100 \text{ мм}^2$, 8 ядерных длин.

Представленные в диссертации результаты исследований были получены на канале №14 70-ГэВ ускорителя ИФВЭ. Пучок частиц выделялся четырьмя сцинтилляционными счётчиками. В случае необходимости непосредственно перед спектрометрами располагался счётчик размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$.

Координаты частиц при исследованиях электромагнитных калориметров (ЭМ) определялись кремниевым микростриповым детектором с шириной полосы 200 мкм. При изучении адронного калориметра координаты частиц определялись проволочной пропорциональной камерой. Все измерения были проведены с использованием 12-бит АЦП. Система сбора данных базировалась на PC/AT и могла принимать и обрабатывать до 1000 событий/сек.

Для иллюстрации возможностей некоторых из перечисленных выше спектрометров в диссертации приводятся данные, полученные нами также и при более высоких энергиях на 450-ГэВ ускорителе CERN.

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НА КРИСТАЛЛАХ PWO

В последние годы проводился интенсивный поиск нового поколения сцинтилляторов: плотных, быстрых и радиационно-стойких. Исследования велись в основном по двум направлениям: фториды (CeF_3 , BaF_2 , PbF_2 ...) и оксиды (BGO , GSO , $\text{NaBi(WO}_4)_2$, PbWO_4 ...).

Среди фторидов многообещающим был CeF_3 . В результате проведённых исследований [1-3] стало очевидным, что среди оксидов вольфрамат свинца PbWO_4 (PWO) является наиболее перспективным материалом для ЭМ-калориметрии в физике

высоких энергий. Многоячейстые калориметры, изготовленные из этих быстрых и очень плотных кристаллов, радиационно стойки, компактны и технологичны. Это позволяет решить проблему высокоточной регистрации фотонов (электронов) в экспериментах на будущих ускорителях, как на встречных (pp , e^+e^-), так и на выведенных пучках. Такой калориметр играет ключевую роль в двух проектах на LHC: ALICE¹ - эксперимент по поиску кварк-глюонной плазмы и термальных фотонов в ион-ионных столкновениях, и CMS² - эксперимент на pp -коллайдере, одна из основных целей которого – поиск Хиггсовских бозонов.

1.1. Свойства кристаллов PWO

Основные характеристики PWO

Монокристаллы PWO выращиваются методом Чохральского в платиновых тиглях при температуре $\approx 1000^\circ\text{C}$ в атмосфере, близкой по составу к воздуху. В качестве сырья используется смесь окисей свинца и вольфрама PbO и WO_3 , чистотой не хуже 99,99%. Диаметр выращенных кристаллов до 40 мм и длина до 260 мм, хотя имеются и кристаллы, выращенные на специальном оборудовании, диаметром более 70 мм и весом около 12 кг. Они легко поддаются механической обработке на стандартном оборудовании.

PWO - очень плотное вещество ($\rho = 8,3 \text{ г/см}^3$) с одной из наименьших, среди известных кристаллов, радиационной длиной ($X_0 = 0,87 \text{ см}$). Его радиус Мольера (R_M) составляет около 20 мм, что обеспечивает небольшие поперечные размеры ЭМ-ливня и высокую пространственную точность измерения координат фотонов (электронов). Основные характеристики PWO и некоторых других тяжёлых монокристаллов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики некоторых тяжёлых кристаллов.

Кристалл	Плотность, г/см^3	Радиационная длина, $X_0, \text{ см}$	Мольеровский радиус, $R_M, \text{ см}$	Светоизлучение, % от BGO	Время высыпания, нс	Максимум спектра излучения, нм	Коэффициент преломления
BGO	7,13	1,12	2,25	100	300	480	2,15
CeF ₃	6,16	1,68	2,63	45	5/20	300/340	1,62
BaF ₂	4,89	2,05	4,4	40	0,9/630	210/320	1,49
PbWO ₄	8,28	0,87	2,19	5	1,5/7/30	420-520	2,16
NaBi(WO ₄) ₂	7,57	0,98	2,66	Черен.	-	-	2,05
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂	7,02	1,45	2,4	Черен.	-	-	2,0
PbF ₂	7,56	0,95	2,2	Черен.	-	-	1,82

¹ ALICE LoI, CERN/LHCC 93-16, Geneva, 1993.

² CMS LoI, CERN/LHCC 92-3, Geneva, 1992.

Спектроскопия монокристаллов PWO

В спектрах люминисценции монокристаллов PWO под воздействием UV-возбуждения наблюдаются по крайней мере три полосы с максимумами около 420, 490 и 650 нм. При γ -возбуждении (^{57}Co , 122 КэВ) наблюдаемый спектр свечения является суперпозицией указанных выше полос (рис.1). При этом обнаружено, что относительная интенсивность голубой и зелёной люминисценций и их вклад в суммарный спектр сильно зависят от чистоты кристалла и условий его выращивания. Положение максимума суммарной полосы люминисценции меняется от 420 до 520 нм в зависимости от технологии выращивания кристаллов.

Световыход монокристаллов PWO был определён путём сравнения с кристаллом BGO тех же размеров ($1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$). Амплитудные спектры, полученные с кристаллами PWO и BGO, при облучении их фотонами от ^{137}Cs (660 КэВ) и ^{241}Am (60 КэВ), показаны на рис. 2. Образцы были отполированы и обёрнуты в алюминизированный майлар. Световыход PWO, измеренный с помощью фотоумножителя с двухщелочным фотокатодом, составляет около 5% от BGO.

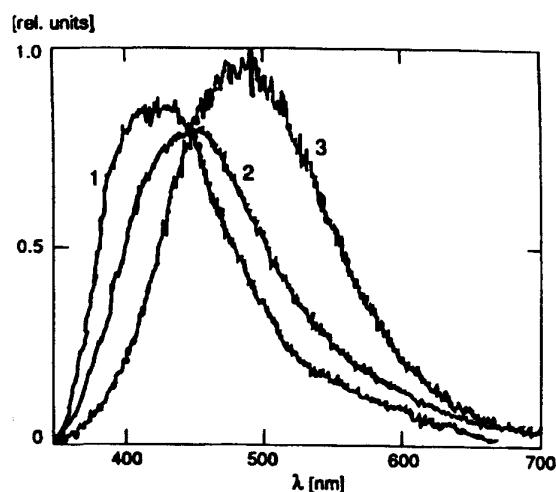


Рис. 1. Спектры люминисценции кристаллов PWO под воздействием UV-возбуждения.

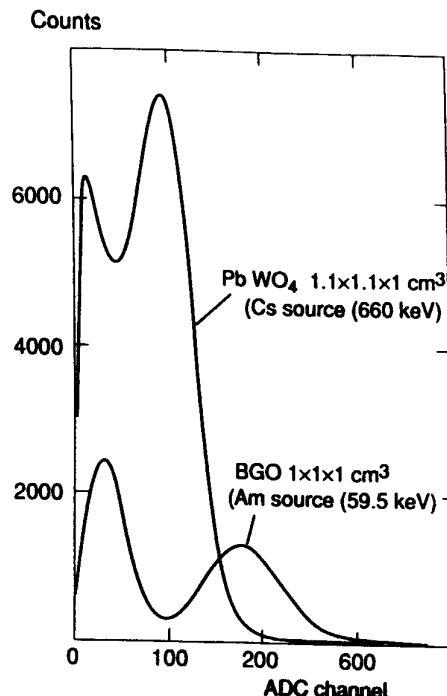


Рис. 2. Амплитудные спектры кристаллов PWO и BGO.

Кинетика люминисценции кристаллов PWO была измерена путем UV-возбуждения. Люминисценция в голубой полосе (430 нм) очень быстрая, она описывается двумя экспонентами с показателями 2 и 7 нс. (рис. 3). На рис. 4 представлена осциллограмма сигнала с ячейки PWO, установленной на ФЭУ XP2020Q при её облучении электронами с энергией 50 ГэВ. 90% сигнала умещается в 30 нс.

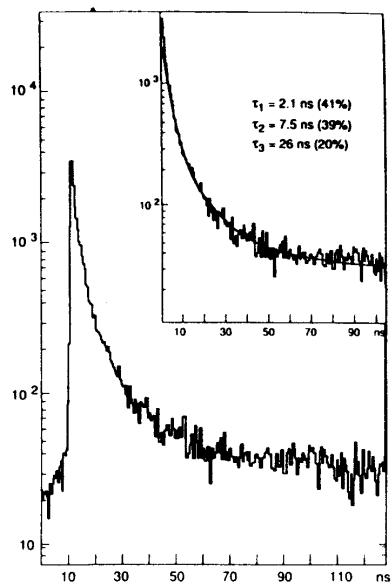


Рис.3. Кинетика излучения кристаллов PWO.

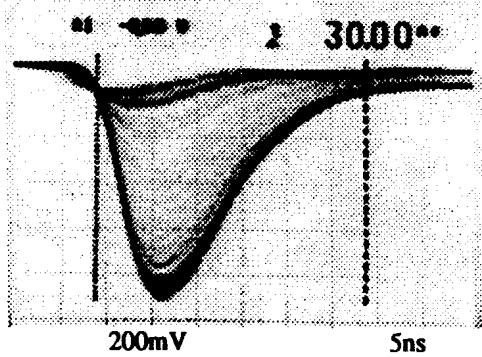


Рис.4. Осциллографмма сигнала с ячейки PWO при её облучении электроном с энергией 50 ГэВ.

Кристаллы PWO, выращенные в оптимальных условиях, обладают высокой радиационной стойкостью. Изменения световыххода даже при больших дозах облучения не наблюдалось. Однако изменение прозрачности происходит уже при дозах в сотни Рад. Согласно спецификации эксперимента CMS, продольная прозрачность кристалла (длина 230 мм) при облучении его гамма-квантами на уровне 15 Рад/час до суммарной дозы 500 Рад, не должна меняться более, чем на 5%. Такие изменения могут быть отслежены с помощью системы мониторирования. Сегодня все производимые в России кристаллы удовлетворяют этому требованию.

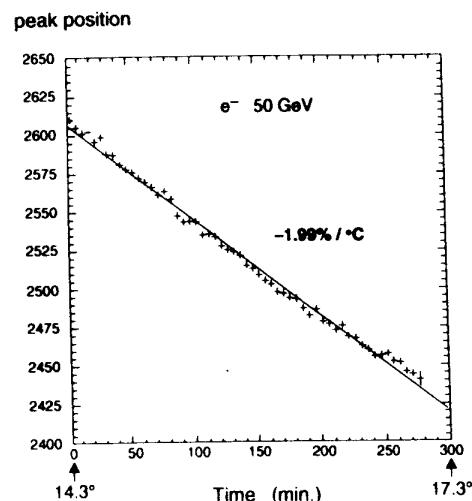


Рис.5. Зависимость световыххода кристалла PWO от температуры, измеренной на пучке электронов с энергией 50 ГэВ.

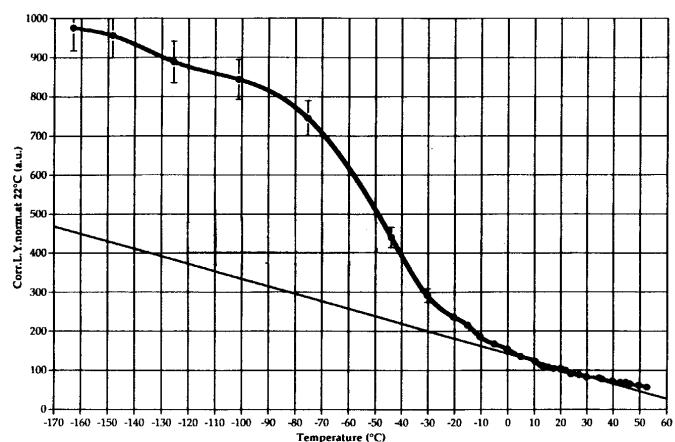


Рис.6. Световыхход PWO, измеренный в широком диапазоне температур.

Температурная зависимость световыххода измерялась непосредственно при облучении кристалла PWO 50-ГэВ электронами (рис. 5). Видно, что его световыхход в области комнатных температур меняется с коэффициентом ~2%/градус. Были проведены также измерения световыххода в области от -170° до +50°. Результаты этих измерений представлены на рис. 6. При низких температурах наблюдается резкое увеличение световыххода, однако временные характеристики значительно ухудшаются.

1.2. Измерения на пучках электронов

Условия измерений

Первые измерения характеристик прототипа ЭМ-калориметра на PWO были проведены на пучках электронов с энергией 4 и 26 ГэВ, полученных на 70-ГэВ ускорителе ИФВЭ.

Из шести выращенных кристаллов PWO для испытаний на пучке были отобраны четыре (серийные номера 1, 2, 5 и 6). Их свойства были неодинаковы из-за разных условий роста.

Поперечные размеры ячейки (22 x 22 мм²) были выбраны равными около одного радиуса Мольера, что является оптимальным для калориметров подобного типа. Ячейки №1 и №2 были 150 мм длиной, №5 и №6 - 160 и 180 мм, что соответствует 17, 18 и 20 радиационным длинам. Все кристаллы были отполированы и обёрнуты в алюминизированный майлар.

В качестве фотодетекторов использовались два типа небольших ФЭУ: отечественный ФЭУ-147 с мультищелочным фотокатодом и Филипс-XP1911. При изучении одиночных кристаллических ячеек использовались фотоумножители с фотокатодом большего размера: ФЭУ-84-3 и Филипс-XP2020Q. Усиление ФЭУ контролировалось с помощью импульсных светодиодов.

Четыре ячейки, изготовленные из кристаллов NBW, и восемь ячеек из GGG использовались для завершения матрицы 4 x 4. Эти кристаллы являются чистыми черенковскими радиаторами (см. главу 2).

Координатная точность прототипа калориметра и профиль ЭМ-ливня были определены путем перемещения матрицы поперёк пучка.

Результаты измерений

Временные характеристики, поглощение света

Перед сборкой матрицы каждая ячейка была протестирована с ФЭУ XP2020Q на 26-ГэВ пучке электронов. Этот ФЭУ не является оптимальным для света, испускаемого PWO. На длине волны 500 нм квантовая эффективность его фотокатода не превышает 5%. В случае черенковского света от GGG и NBW эта величина достигает 30%.

Амплитудные спектры, измеренные в ячейках NBW и PWO №6, показаны на рис. 7. Эти кристаллы имеют близкие показатели преломления и радиационные длины.

Из рис. 7 видно, что отношение сигналов от этих кристаллов ≈ 4 . Оно увеличивается до 10 при использовании ФЭУ-84-3.

Сигналы, наблюдаемые в ячейке PWO №6 с ФЭУ XP2020Q, имеют длительность 15 нс на полувысоте и 25 нс на уровне 10%. "Хвосты" импульсов становятся пренебрежимо малыми после 100 нс. На рис. 8 приведена зависимость величины заряда от длительности строб-импульса АЦП для четырёх кристаллов PWO. Для сравнения приведены данные для черенковского радиатора GGG.

Поглощение собственного света было измерено на пучке мюонов для каждой ячейки PWO. Матрица была развернута перпендикулярно пучку. Координаты мюонов определялись сцинтилляционным гаммоскопом с шагом 2 мм. На рис. 9 показаны результаты, полученные для PWO № 6. Длина поглощения превышает 1 м, этого достаточно, чтобы уменьшить вклад продольных флуктуаций ливня в энергетическое разрешение (постоянный член в σ_E/E) до уровня существенно ниже одного процента.

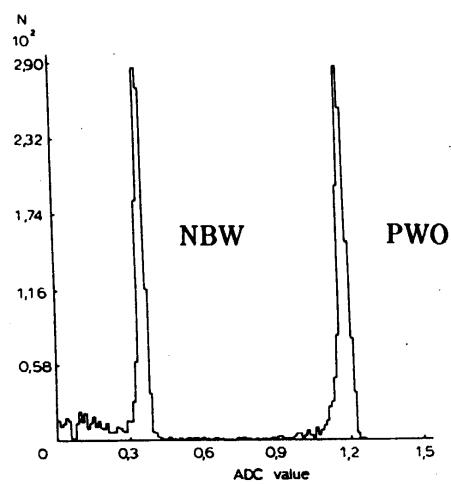


Рис. 7. Амплитудные спектры с одиночных ячеек PWO и NBW, измеренные с бищелочным ФЭУ в пучке электронов с энергией 26 ГэВ.

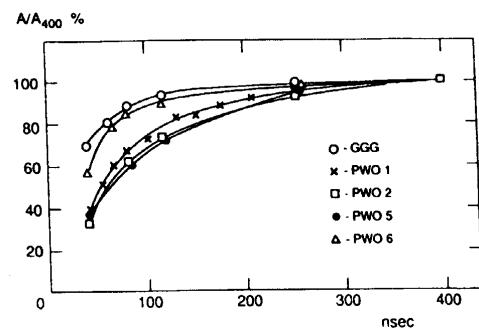


Рис. 8. Зависимость сигнала ячейки PWO от длительности строб-импульса АЦП.

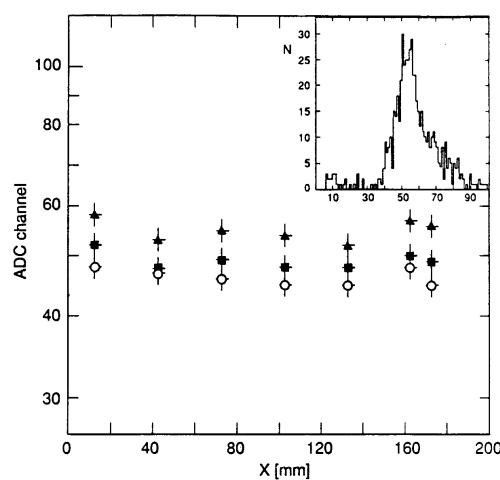


Рис. 9. Амплитуда сигнала с ячейки PWO в зависимости от координаты мюона.

Энергетическое разрешение

Ниже приводятся результаты первых измерений энергетического разрешения прототипа PWO-калориметра в пучке электронов.

Амплитудные спектры для одиночных ячеек NBW и PWO №6, измеренные с ФЭУ XP2020Q на пучке электронов с энергией 26 ГэВ при размерах пучка $3 \times 3 \text{ мм}^2$, показаны на рис. 7. Энергетическое разрешение у ячейки PWO $\sigma_E / E \approx 1\%$ примерно в два раза лучше, чем у ячейки NBW.

Энергетические спектры с матрицы 8×5 кристаллов PWO, облученной электронами с энергией до 100 ГэВ на ускорителе ЦЕРН, представлены на рис. 10.

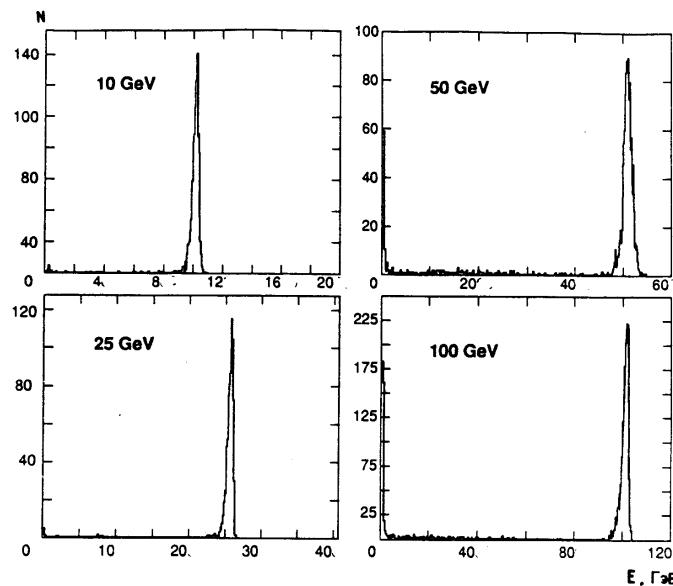


Рис. 10. Спектры с матрицы кристаллов PWO 8×5 , полученные при облучении электронами с энергией от 10 до 100 ГэВ на канале H8 CERN.

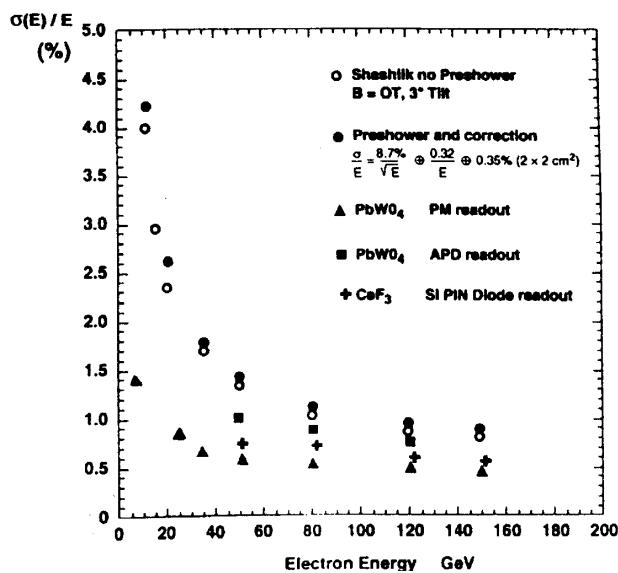


Рис. 11. Энергетическое разрешение матрицы PWO с различными фотодетекторами в сравнении с CeF₃.

Зависимость энергетического разрешения матрицы PWO с разными фотодетекторами от энергии пучка, измеренная в ИФВЭ и ЦЕРН, представлена на рис. 11. Видно, что уже при энергии около 50 ГэВ энергетическое разрешение выходит на уровень 0,5%, что являлось одним из основных требований при принятии PWO в качестве материала для электромагнитного калориметра CMS.

Координатное разрешение

Метод точного измерения координат в ЭМ-калориметре типа ГАМС из свинцового стекла был описан ранее^{3,4}. Координатная точность для ячейки $40 \times 40 \text{ mm}^2$ из свинцового стекла составляет $\sigma_x \approx 1,5 \text{ mm}$ при энергии фотонов или электронов $\approx 20 \text{ ГэВ}$. В случае калориметра из кристаллов PWO поперечный размер ЭМ-ливня в два раза меньше, чем в свинцовом стекле. В результате значение σ_x в PWO калориметре с оптимальным размером ячейки должно быть в два раза меньше.

Для определения величины σ_x и ширины ливня в ячейках PWO было проанализировано более 100 тыс. ливней от электронов с энергией 26 ГэВ, зарегистрированных при четырех положениях матрицы относительно пучка. На рис. 12 показана зависимость координаты, измеряемой как центр тяжести сигналов ячеек, от реального положения электрона, определяемого при помощи микрострипового детектора. После коррекции³ эта зависимость становится линейной.

Координатное разрешение матрицы для различных точек входа электрона показано на рис. 13. Возле края ячейки σ_x меньше чем 400 мкм, вблизи центра эта величина возрастает до 900 мкм.

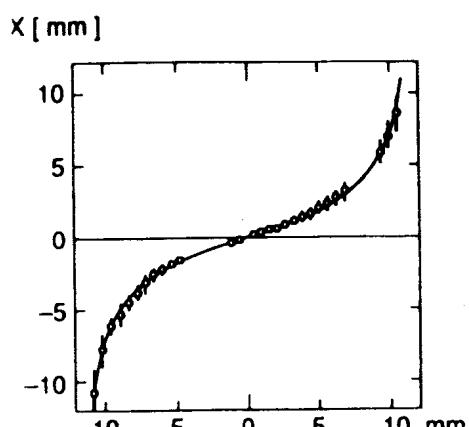


Рис. 12. Зависимость координаты электрона, измеряемой как центр тяжести сигналов ячеек, от реального положения электронов относительно центра ячейки.

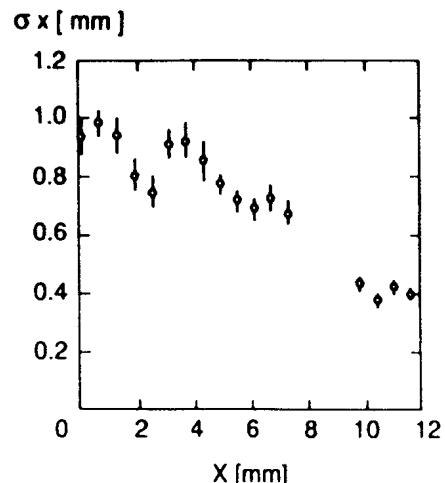


Рис. 13. Координатное разрешение матрицы для различных точек входа электрона относительно центра ячейки.

³ F.Binon et al.// Nucl.Instr.Meth. 1981. V.188. P.507.

⁴ G.A.Akopdjanov et al.// Nucl.Instr.Meth. 1977. V.140. P.441.

Точность измерения координат ЭМ-ливня, измеренная на матрице 7x7 кристаллов PWO, при энергии электрона 50 ГэВ представлена на рис. 14. Координаты электрона измерялись с помощью дрейфовой камеры. Видно, что при размерах ячейки 22 x 22 мм², что близко к оптимальной, точность измерения координат становится лучше 0,5 мм. Сегодня это самая высокая точность, достигнутая в электромагнитной калориметрии при высоких энергиях.

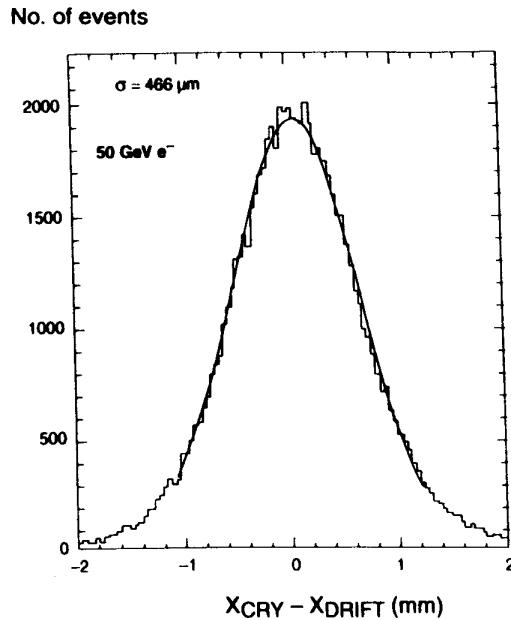


Рис. 14. Точность измерения координат ЭМ-ливня, измеренная на матрице 7 x 7 кристаллов PWO при энергии 50 ГэВ.

Даже при увеличении поперечных размеров ячейки до 30 мм точность определения координат остаётся лучше 1 мм, хотя неоднородность её по кристаллу возрастает.

Профили ЭМ-ливней в калориметрах из GGG, NBW, PWO показаны на рис. 15. Ливни в тяжёлых кристаллах в два раза уже, чем в свинцовом стекле. Из опыта разделения ливней в ГАМС следует, что два фотона (электрона) могут быть надёжно разделены в PWO-калориметре, когда они находятся на расстоянии около 15 мм друг от друга. Эта величина критична для экспериментов ALICE и CMS из-за высокой загрузки детекторов частицами.

Первый спектрометр γ -квантов, состоящий из 150 гексагональных кристаллов PWO, был изготовлен в рамках подготовки эксперимента НЕПТУН совместно с экспериментом ГАМС и размещён в центре γ -детектора ГАМС-2000⁵. Цель создания – измерение физических характеристик детектора в реальном эксперименте. Результаты этой работы показали, что спектрометр способен разделять два γ -кванта при расстоянии между ними 12-15 мм.

⁵ D.Alde et al. // Nucl.Instr.Meth. 1985. V.A240. P.343.

На рис. 16 представлен спектр масс событий с двумя γ -квантами в PWO спектрометре. Чётко выделяются события с образованием π^0 - и η -мезонов в зарядовообменных процессах. Разрешение по массе при оптимальном расстоянии от мишени равно

$$\sigma_M / M_{2\gamma} = 1,5\%.$$

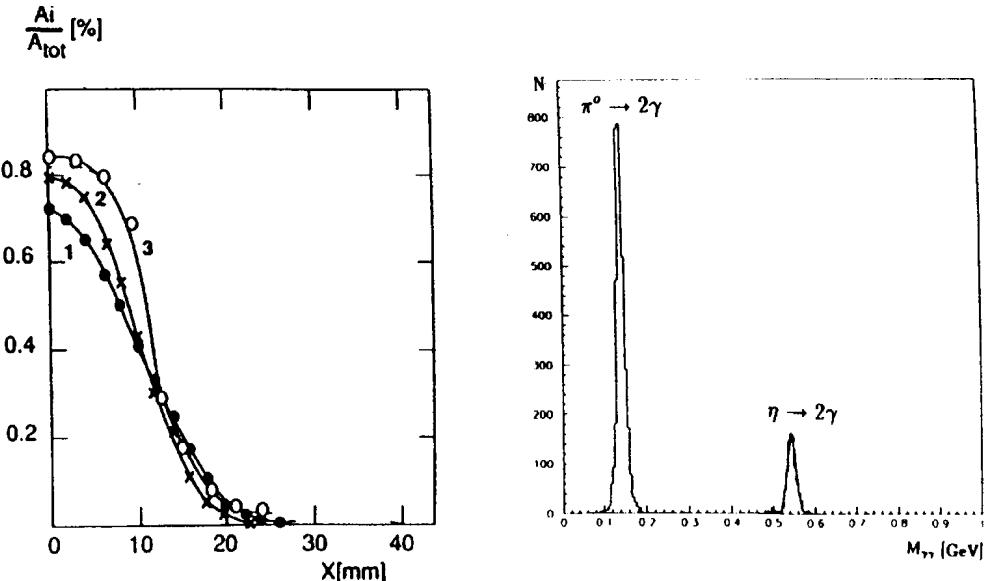


Рис. 15. Профиль ливня в калориметрах из GGG, NBW, PWO:
1 – NBW; 2 – GGG; 3 – PWO,
где X – расстояние от центра ячейки.

Рис. 16. Спектр масс событий с двумя γ -квантами в PWO-спектрометре.

Внедрение автором кристаллов вольфрамата свинца в физику высоких энергий обеспечило ей реальный прорыв в области прецизионной электромагнитной калориметрии. Дешёвый ($1,5–3$ доллара/см 3) и технологичный при выращивании и обработке кристалл, обладающий уникальными характеристиками (высокая плотность, малая радиационная длина, высокая прозрачность и хорошая радиационная стойкость), занял лидирующие позиции в электромагнитной калориметрии. Наличие в России огромных мощностей для его производства (около 500 ростовых установок) позволяет верить в реальность создания крупнейших электромагнитных калориметров нового поколения на LHC.

2. ЧЕРЕНКОВСКИЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НА ТЯЖЁЛЫХ КРИСТАЛЛАХ

Применение в ЭМ-калориметрии тяжёлых кристаллов в качестве черенковских радиаторов имеет следующие преимущества по сравнению со свинцовыми стеклами: более высокая радиационная стойкость, меньший мольеровский радиус и значительно меньшая радиационная длина, которая может быть менее 1 см.

Для исследования возможности использования тяжёлых кристаллов в качестве черенковских радиаторов были выбраны кристаллы гадолиний-галлиевого граната $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) и $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ (NBW), которые в достаточном количестве производились промышленностью. Их характеристики приведены в табл. 1 главы 1.

2.1. Конструкция макетов спектрометра и измерения на пучке

Для исследований возможности использования перечисленных выше кристаллов в калоримерии были созданы три макета спектрометров, состоящих из 16 ячеек каждый, размером $21 \times 21 \times 250 \text{ mm}^3$ для кристалла GGG и $21 \times 21 \times 200 \text{ mm}^3$ для NBW, что соответствовало 17 X_0 для GGG и 20 X_0 для NBW. Ячейки были уложены в матрицы 4×4 . Каждая оборачивалась алюминизированным майларом, обеспечивающим светоизоляцию и улучшающим светосбор, и через торец просматривалась фотоумножителем ФЭУ-147. Оптический контакт осуществлялся силиконовым компаундом с коэффициентом преломления 1,5.

Измерения были проведены на пучке электронов при энергии 26 ГэВ. Калибровка макетов проводилась путём установки каждой ячейки на пучок.

Для определения количества черенковского света, собираемого ФЭУ, были проведены измерения, при которых на ФЭУ XP2020Q последовательно ставились ячейка из свинцового стекла ТФ-1 и ячейки GGG и NBW. Используя данные работы⁶, где было измерено количество фотоэлектронов для ячейки из свинцового стекла ТФ-1, было оценено число фотоэлектронов для ячеек GGG и NBW для ФЭУ с двухщелочным фотокатодом. Для ячейки из GGG оно оказалось равным 1200 ф.э./ГэВ, для ячеек из NBW эта величина составила 400 ф.э./ГэВ. Такая разница связана с гораздо худшей прозрачностью NBW для черенковского света.

Продольная неоднородность ячеек из GGG и NBW для черенковского света была измерена на пучке пионов при перемещении матриц поперёк пучка. На рис. 17 представлена зависимость сигнала от продольной координаты ячейки. Видно, что прозрачность GGG, серийно изготавливаемого промышленностью, может быть на уровне 1 м. Что касается кристаллов NBW, то до настоящего момента не удалось вырастить оптически чистый кристалл, NBW имеет характерную желтоватую окраску. Его прозрачность для черенковского света находится на уровне $30 \div 40 \text{ см}$.

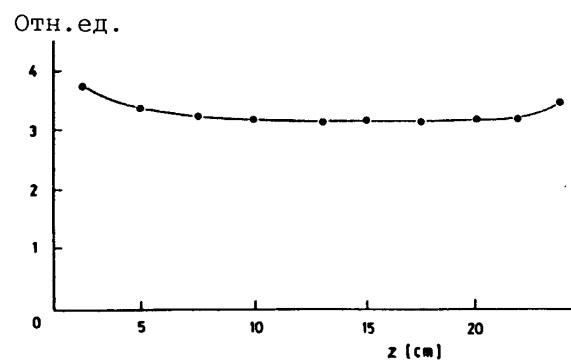


Рис. 17. Продольная неоднородность световыххода ячейки GGG.

⁶ V.A.Davydov et al./Nucl. Instr.Meth. 1977. V.145. P.267.

На рис. 18 представлены спектры с одиночных ячеек и суммарные спектры с матриц макетов спектрометров. Энергетическое разрешение при энергии 26 ГэВ для макета из GGG составляет $\approx 2\%$, для макета из NBW $\approx 2,5\%$.

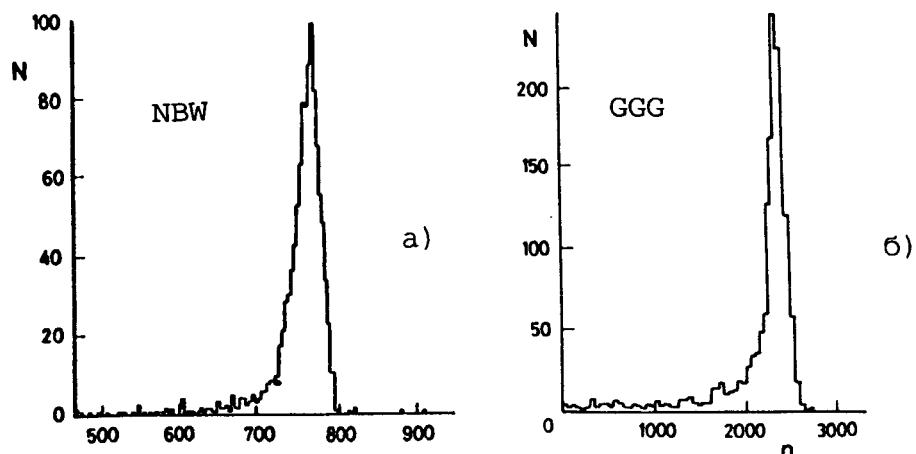


Рис. 18. Спектры электронов с энергией 26 ГэВ:
а) спектр с ячейки NBW; б) спектр с ячейки GGG.

Учитывая импульсный разброс электронов в пучке, который составлял $\sim 1,5\%$, и количество вещества по каналу (~ 10 г), энергетическое разрешение спектрометра, выполненного на основе монокристалла GGG, может быть значительно лучше разрешения, достигнутого на тяжёлых свинцовых стёклах. Наши измерения показывают, что такой детектор может обладать разрешением на уровне $3,5 - 4\%/\sqrt{E}$.

Координатное разрешение макетов представлено на рис. 19. В обоих случаях оно составляет $\sigma \approx 0,7 \div 0,8$ мм, что примерно в 2 раза лучше, чем для спектрометров типа ГАМС.

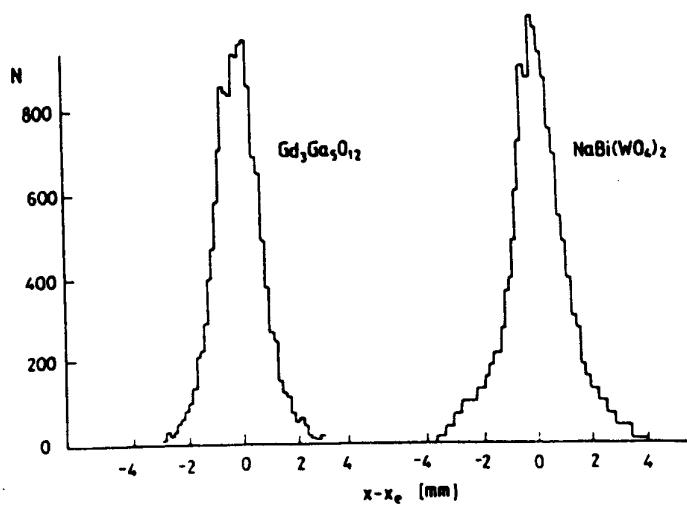


Рис. 19. Точность измерения координат черенковскими спектрометрами на кристаллах GGG и NBW, измеренная в пучке электронов 26 ГэВ.

На рис. 15 (глава 1) представлены измеренные профили электромагнитного ливня. Как для макета на GGG, так и для NBW, поперечные размеры ливня примерно в 2 раза меньше чем для спектрометров типа ГАМС. Соответственно пространственное разрешение черенковского спектрометра на кристаллах составляет ~ 12 мм, что в два раза лучше, чем у спектрометров типа ГАМС.

Измерялась также радиационная стойкость данных кристаллов. Кристалл GGG после облучения γ -квантами на уровне 10^5 Рад приобрёл коричневую окраску. Его прозрачность до и после облучения показана на рис. 20. Однако он восстанавливает свои оптические свойства: в темноте – за 1 месяц, при дневном свете – за 1 неделю и при облучении ультрафиолетовой лампой – за несколько часов. Что касается кристалла NBW, то даже при облучении его до ~ 10 Мрад изменения его оптических свойств не наблюдалось.

Радиационную стойкость GGG можно значительно улучшить добавкой иттербия без изменения его оптических свойств. Однако даже чистый GGG обладает радиационной стойкостью на порядок выше, чем свинцовое стекло.

При сравнении стоимости спектрометров на тяжёлых кристаллах и спектрометров типа ГАМС следует учитывать, что кристаллические детекторы, обладая в 2 раза лучшим пространственным разрешением, могут быть расположены в 2 раза ближе к мишени без потерь эффективности, связанных с перекрытием электромагнитных ливней. При этом площадь спектрометра на кристаллах уменьшается в 4 раза. Вес одной кристаллической ячейки составляет около 600 г, тогда как вес ячейки ГАМС - 2,5 кг.

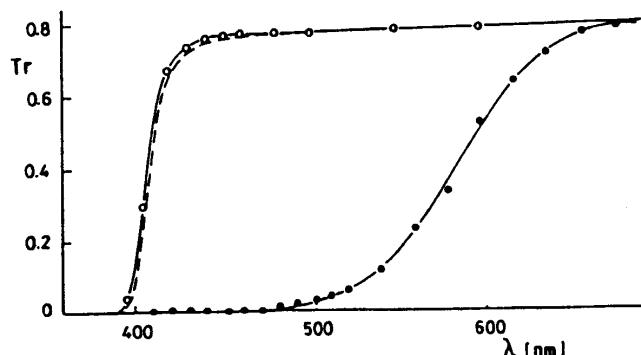


Рис. 20. Прозрачность кристалла GGG размером $2 \times 2 \times 4$ см³:
○ - необлучённый кристалл, ● - после облучения кристалла радиоизотопом
 ^{60}Co до 10^5 Рад; пунктирная кривая - прозрачность кристалла спустя 15 дней
после облучения.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СЛОИСТЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ.

Слоистые спектрометры или спектрометры типа сандвич представляют собой чередующиеся слои пассивного вещества-поглотителя, в котором происходит развитие ЭМЛ и активного вещества, регистрирующего прохождение заряженных частиц, ливня. В качестве активного слоя обычно используются сцинтилляторы, пластические

или жидкие, но возможно применение благородных газов в жидким или твёрдом состоянии, или пластин кремния. Светосбор со сцинтилирующих слоев обычно производится с помощью световодов-сместителей спектра, называемых в зарубежной литературе Wavelength Shifter(WLS). Этот способ, впервые предложенный Шерклифом в 1951 г, получил в наше время широкое распространение.

При суммарной толщине активного и пассивного слоёв X полная длина Т треков заряженных частиц делится на N частей:

$$N = T/X = (E/E_c) \cdot (1/t), \quad (1)$$

где $t = X/X_0$ - толщина слоя в единицах радиационной длины, E_c – критическая энергия. Используя распределение Пуассона, можно получить приближённое ограничение на энергетическое разрешение сандвича, связанное с флюктуациями количества электронов и позитронов, прошедших через активный слой (так называемые sampling флюктуации).

$$\sigma_E/E_{\text{sampl}} = 1/\sqrt{N} = \sqrt{E_c} \cdot \sqrt{t/E} = 3.2\% \sqrt{E_c} (\text{МэВ}) \cdot \sqrt{t/E} (\text{ГэВ}). \quad (2)$$

Из этого ограничения можно сделать вывод, что для поглотителя предпочтительнее использовать вещества с малой критической энергией E_c . Отсюда также видно, что толщина слоя поглотителя должна быть как можно меньшей. Однако нельзя забывать, что уменьшение толщины поглотителя приводит к увеличению вклада в энергетическое разрешение эффектов, связанных с продольными флюктуациями ливня [формула (4)]. При этом разрешение зависит и от толщины активного вещества.

Для слоистых детекторов весьма существенными являются также флюктуации энергетических потерь dE/dx в активном веществе (флюктуации Ландау).

Имеются также флюктуации длины трека, определяемые угловым разбросом частиц ЭМЛ и их многократным рассеянием в веществе калориметра. При выборе методики регистрации γ -квантов и электронов высокой энергии следует учитывать вклад каждого из трёх перечисленных факторов, ограничивающих энергетическое разрешение сандвича.

Вклад в энергетическое разрешение, обусловленный статистикой фотоэлектронов, зависит от правильного подбора сцинтиллятора, WLS и ФЭУ. Этот вклад определяется следующей формулой:

$$\sigma_{\text{ph,st}}/E = 1/\sqrt{N_0} \cdot 1/\sqrt{E}, \quad (3)$$

где N_0 - количество фотоэлектронов, выбивающихся из фотокатода ФЭУ при попадании в детектор частицы с энергией 1 ГэВ.

Рассмотренные ограничения на энергетическое разрешение, кроме флюктуаций продольного развития ливня и связанных с ними флюктуаций поглощения переизлученного света в WLS (из-за конечной прозрачности), имеют энергетическую зависимость типа $E^{-1/2}$, в то время как последние имеют зависимость существенно более слабую. Именно этот вклад становится определяющим при высоких

энергиях. Исходя из предположения, что затухание света в сместителе спектра происходит по экспоненциальному закону, а ливень флюктуирует в среднем на одну радиационную длину, этот вклад можно представить следующим образом:

$$\sigma_{WLS}/E = 1 - \exp[-(kt_0/\lambda)], \quad (4)$$

где t_0 - радиационная длина детектора в сантиметрах; λ - длина затухания света в WLS (величина, характеризующая прозрачность WLS и определяемая как длина, на которой количество света в шифтере уменьшается в e раз); коэффициент $k \approx 0,8 \div 1,0$ определяется конструкцией детектора.

В табл. 2 приведены величины σ_E/E при $E=1$ ГэВ для различных типов слоистых детекторов и ограничения, связанные

$$\sigma_E/E_{\text{sampl}}, \sigma_E/E_{\text{Landau}}, \sigma_E/E_{\text{long}}.$$

Таблица 2. σ_E/E при $E = 1$ ГэВ для различных типов слоистых калориметров.

Тип калориметра	Al/сцинт	Fe/LAr	Cu/сцинт	W/Si	Pb/Ar+CO ₂	U/сцинт
Толщина пасс/акт вещества (мм)	89/30	1,5/2,0	5/2,5	7/0,2	2,0/10,0	1,6/2,5
Эксперим. велич. σ_E/E при $E=1$ ГэВ (%)	20	7,5	13,0	25,0	20,0	11,0
$\sigma_E/E_{\text{sampl}}$	23	4,8	9,2	19,1	8,2	10,6
$\sigma_E/E_{\text{Landau}}$	3,8	1,0	1,0	4,5	8,7	1,0
σ_E/E_{long}		5,7	6,0	17,5	13,0	6,0
σ_E/E_{tot} (расчет)	23	7,5	12,0	25,9	17,7	12,2

Общими для всех спектрометров причинами, также ограничивающими энергетическое разрешение, являются:

- шумы электроники (нестабильность пьедесталов и всевозможные наводки);
- шумы, возникающие при суммировании большого количества каналов (когерентный шум);
- неточность определения калибровочных коэффициентов;
- стабильность системы мониторирования этих коэффициентов во времени;
- кратковременная стабильность фотодетекторов.

Существует большое разнообразие конструкций калориметров, использующих методику WLS. В основном они отличаются материалом и конструкцией шифтера. Энергетическое разрешение подобных детекторов может быть достаточно хорошим, сравнимым с разрешением спектрометров на свинцовых стеклах.

Сцинтилляционные спектрометры обладают высокими временными характеристиками, которые уступают только черенковским спектрометрам полного поглощения. В настоящее время появились сместители спектра с очень малыми

временами переизлучения. На таких WLS созданы модули калориметров с длительностью выходного импульса фотоумножителя ≈ 12 нс.

Основным недостатком сандвича с WLS является их пространственная неоднородность, связанная с наличием шифтера. Заряженные частицы ливня, пересекая световод - смеcтитель спектра, вызывают в нём черенковский свет. Чем ближе проходит ось ливня от WLS, тем больший вклад в сигнал с ФЭУ будет он вносить. Таким образом, около шифтеров образуются так называемые "горячие зоны", которые ухудшают однородность детектора.

Вклад черенковского излучения в энергетическое разрешение детектора можно записать в следующем виде:

$$\sigma_C/E = \sigma_1(X)/\sqrt{E} , \quad (5)$$

где $\sigma_1(X)$ - зависимость флюктуаций черенковского света в WLS от координаты точки входа электрона с энергией 1 ГэВ в детектор. Использование определённых гасящих добавок, вводимых в вещество световода, позволяет несколько уменьшить количество черенковского света.

Второй причиной, приводящей к появлению "горячих зон", является наличие щели, в которой располагается шифтер. При попадании частицы в эту щель электромагнитный ливень не развивается из-за отсутствия вещества-поглотителя. Следовательно, чем меньше толщина WLS, тем лучше однородность всего детектора.

4. МЕЛКОЯЧЕИСТЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР НА ОСНОВЕ САНДВИЧА ВОЛЬФРАМ - СЦИНТИЛЛЯТОР

Альтернативой сравнительно дорогим спектрометрам на тяжёлых кристаллах может быть сандвич металл-сцинтилятор.

Для обеспечения минимальных размеров ЭМ-ливня, в качестве пассивного вещества был выбран металлический вольфрам плотностью $19,3$ ($\text{г}/\text{см}^3$), радиационной длиной $X_0 = 0,35$ см и мольеровским радиусом $R_M = 0,7$ см. Пассивный слой представляет собой пластину вольфрама 38×37 мм и толщиной 1,5 мм. Активный слой выполнен из пластического сцинтилятора размером 19×19 мм и толщиной 4 мм, разделённый металлизированным майларом, необходимым для обеспечения светоизоляции между счётчиками (см. рис. 21).

Для сборки блока было разработано специальное приспособление, значительно упростившее и ускорившее сборку. В этом же приспособлении производилась и стяжка блока пермаллоевой лентой. Для этого вместо последней вольфрамовой пластины вкладывалась пластина из нержавеющей стали, к которой точечной сваркой приваривалась пермаллоевая лента. Под ленту подкладывался металлизированный майлар, обеспечивающий светоизоляцию между ячейками (см. рис. 21).

Шифтеры толщиной 0,5 мм прокладывались по два с двух противоположных, не закрытых майларом сторон. Светоизоляция достигалась путём прокладывания между ними проволоки толщиной 0,5 мм. Блоки помещались в составной короб из металлической фольги, который скреплялся точечной сваркой.

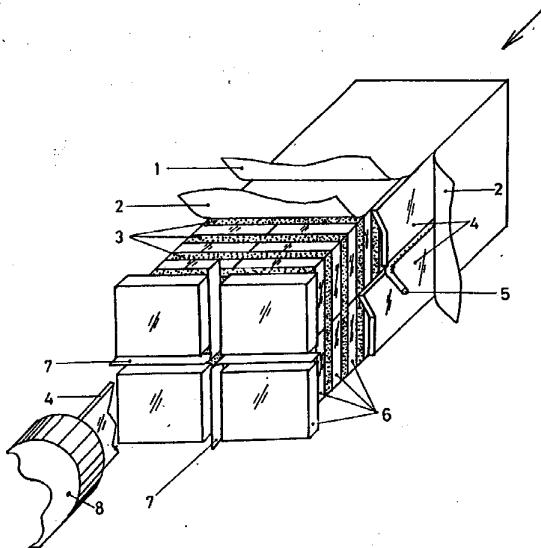


Рис. 21. Общий вид блока.

Цифрами обозначены: 1-permалой; 2-металлизированный майлар; 3-вольфрам; 4-шифтер; 5-проводолка 0,5 мм; 6-сцинтиллятор; 7-светоизоляция между сцинтилляторами в одном слое; 8-ФЭУ. Стрелкой обозначено направление пучка.

По этой технологии были собраны четыре блока. Длина блока, состоящего из 35 слоёв вольфрам-сцинтиллятор, равна 21 см, что составляло около 20 радиационных длин.

Сцинтилляционные пластины изготавливались методом литья под давлением из гранул полистирола с добавками РОРОР и р-терфенила.

Поскольку эксперименты с шифтером подобной толщины проводились впервые, были проведены исследования по подбору оптимального состава спектросмещающей добавки и оптимального процентного содержания добавки в веществе шифтера. В качестве спектросмещающей добавки были испробованы все типы КУМАРИНов. С каждым КУМАРИНом изготавливалась партия шифтеров с различным процентным содержанием добавки. В результате исследований наиболее оптимальной добавкой был признан КУМАРИН-6.

На специальном стенде измерялась длина поглощения каждого шифтера. Среднее значение её для отобранных шифтеров равнялось 50 см. Разброс значений не превышал 10%. Шифтеры стыковались с ФЭУ без оптической замазки.

4.1. Результаты испытаний на пучке

Изучение макета проводилось на пучке электронов с энергией 26 ГэВ. Макет располагался на подвижной платформе, перемещающейся по двум координатам.

Калибровка матрицы из 16 ячеек (4x4) производилась путём установки каждой ячейки в пучок. При этом в ячейке выделялось около 80% энергии пучка. Энергетический спектр электронов с энергией 26 ГэВ, полученный с одиночной ячейки, показан на рис. 22а. Его ширина $\sigma/E \approx 3\%$. На рис. 22б показан суммарный

спектр со всех ячеек. Типичная ширина спектра при попадании пучка в одну из четырёх центральных ячеек $\sigma/E = 2,4 \div 2,5\%$.

На пучке электронов были измерены энергетическое, пространственное и координатное разрешения. Изучалась также однородность детектора в зависимости от координаты попадания электрона, а также зависимость однородности детектора от угла поворота по отношению к пучку.

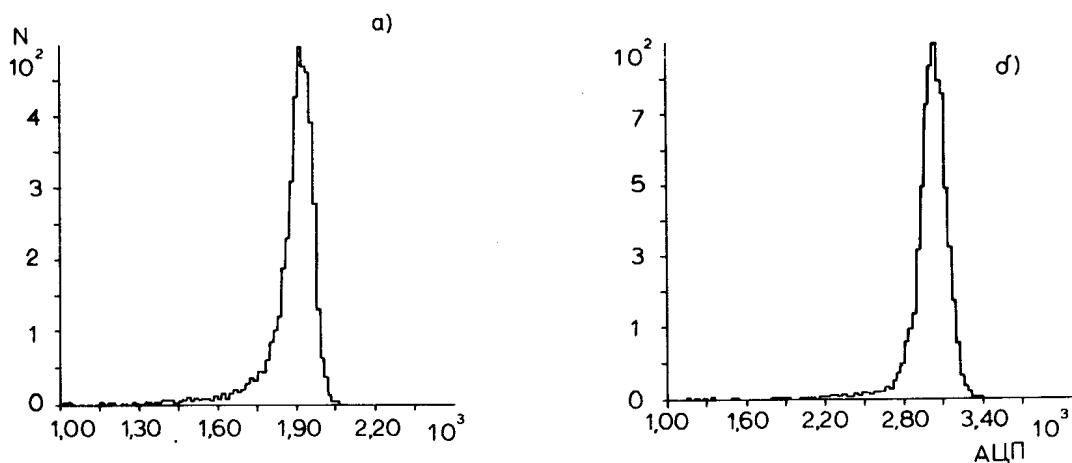


Рис. 22. Энергетические спектры электронов с энергией 26 ГэВ:
а) с одиночной ячейки, б) суммарный спектр со всей матрицы.

Результаты измерения неоднородности показаны на рис. 23, где представлена зависимость суммарного энерговыделения в макете от координаты попадания электрона. Видно значительное улучшение однородности при повороте детектора на небольшой угол - 2-3 градуса.

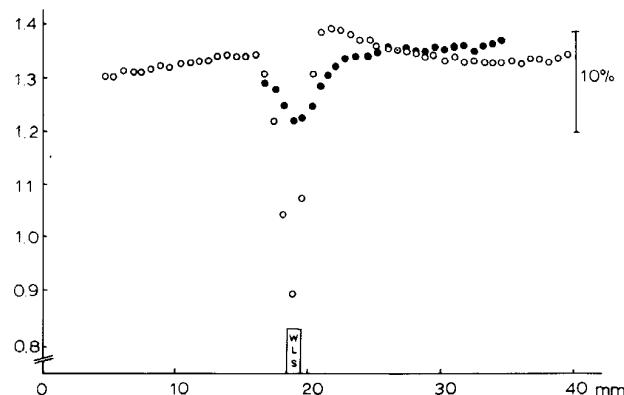


Рис. 23. Зависимость суммарного энерговыделения от координаты попадания электрона
○ - угол 0°, ● - 3°.

В сравнении с детектором на кристаллах сандвич вольфрам-сцинтиллятор имеет примерно в 2-3 раза худшее энергетическое разрешение, однако его стоимость на порядок величины меньше.

5. КОМПЕНСИРОВАННЫЙ СВИНЦОВЫЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

С увеличением энергии роль адронных калориметров заметно возрастает из-за улучшения их основных параметров. Особенно существенной она становится для экспериментов на коллайдерах.

Калориметры, у которых отклик при их облучении электронами (e) и адронами (h) равной энергии одинаков, принято называть компенсированными. Понимание роли отношения e/h ограничило использование тех или иных материалов при создании адронных калориметров. Достичь высоких характеристик в адронной калориметрии можно только в том случае, если выполняется условие компенсации, при котором отношение $e/h = 1$.

Использование свинца в качестве поглотителя позволяет достичь компенсации при отношении толщин 4:1. Компенсация может быть получена также при использовании урана, для которого это отношение равно 1:1. С железом дело обстоит гораздо сложнее, здесь компенсация может быть достигнута только при отношении толщин ~10:1.

При выборе пассивного вещества должны быть учтены и другие факторы и, прежде всего, временные характеристики калориметров, которые зависят от используемого материала поглотителя. Измерения показывают, что отношение e/h урановых калориметров становится близким к единице только при длительности времени интегрирования сигнала порядка 500 нсек. В случае же использования свинца или железа эта величина уменьшается в ≈ 10 раз.

5.1. Конструкция модуля

Модуль адронного калориметра представляет собой сэндвич свинец-сцинтиллятор, отношение толщин которых 4:1 было выбрано исходя из условий компенсации.

Поскольку энергетическое разрешение калориметра особенно при низких энергиях в значительной мере определяется сэмплинг-флуктуациями, толщина пассивного слоя была выбрана сравнительно небольшой и равной 16 мм. При этом толщина сцинтиллятора равна 4 мм. Поперечные размеры модуля 100 x 100 mm², вес ~ 120 кг.

Пакет свинец-сцинтиллятор стягивается стальной лентой толщиной 0,5 мм и укладывается в два п-образных короба, изготовленных из той же стали. Крепление коробов друг к другу осуществляется точечной сваркой.

Технология сборки модулей позволяет собирать их без каких-либо серьёзных переделок с любой толщиной по пучку вплоть до 8 ядерных длин. Испытанные нами модули состояли из 64 пар свинец-сцинтиллятор общей толщиной $\approx 6,5$ ядерных длин. Было изготовлено также несколько модулей, имеющих ≈ 8 ядерных длин.

Для обеспечения необходимой жёсткости модуля первая и последняя пластины выполнены из стали. При изготовлении модулей с количеством ядерных длин около 8, одна из средних свинцовых пластин также заменяется на пластину из стали. Это не приводит к ухудшению характеристик детектора, однако упрощает его сборку, а также обеспечивает необходимую жёсткость модулей в собранном детекторе.

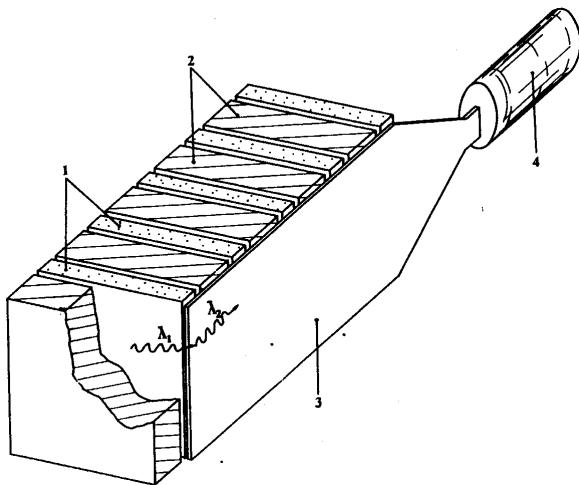


Рис. 24. Схематичное изображение модуля адронного калориметра.

1 – сцинтилляционные пластины; 2 – свинцовый поглотитель;
3 – WLS; 4 – фотоумножитель.

Схематичное изображение модуля представлено на рис. 24. Модуль разработан в двух вариантах: один - для работы в общем светозащитном кожухе, другой - с индивидуальной светоизоляцией.

5.2. Сцинтиллятор и световод-сместитель спектра

Сцинтилляционные пластины изготавливаются методом литья под давлением из гранул полистирола с добавками POPOP и р-терфенила. Световойход такого сцинтиллятора близок к световыходу известного сцинтиллятора NE-110. Неоднородность светосбора с пластины частично компенсировалась чёрной бумагой, закрывающей треть площади пластины, ближайшей к световоду-сместителю спектра (WLS). Измеренная с помощью радиоактивного источника неоднородность сцинтилляционной пластины была не хуже $\pm 2\%$.

Особое значение при изготовлении сцинтилляторов литьевым способом имеет разброс световыххода от пластины к пластине. Проведённые в ходе изготовления измерения показали, что разброс световыхходов 6 тысяч пластин составил $\approx 5\%$. Пластины поглотителя были изготовлены литьевым способом из свинца с добавкой $\approx 3\%$ сурьмы, которая значительно увеличила его прочность.

Для описываемого модуля нами совместно с промышленностью был разработан объёмный WLS из ПММА с добавкой сместителя спектра КУМАРИН-30. Концентрация последнего была оптимизирована таким образом, чтобы длина поглощения света в WLS толщиной 2 мм была около 2 м. При изготовлении WLS использовался способ ориентации молекул ПММА путём его протягивания через фильтеру. Ориентация молекул WLS позволила в $\sim 1,5$ раза увеличить длину поглощения света и заметно улучшить его радиационную стойкость. Длина WLS зависит от

количества ядерных длин в калориметре и составляет 180 см при толщине детектора 8 ядерных длин.

Энергетическое разрешение адронных калориметров при высоких энергиях в значительной мере определяется постоянным членом, величина которого зависит от прозрачности WLS. Это связано с продольными флюктуациями адронного ливня, которые слабо зависят от энергии. В работе⁷ приведены зависимости энергетического разрешения калориметра от энергий при разных длинах поглощения света в WLS. Видно, что при энергиях адронов в несколько сот ГэВ длина поглощения света в WLS должна быть не менее 5 метров.

Изготовить WLS с такими характеристиками весьма непросто. Однако существуют несколько простых способов увеличения эффективной длины поглощения вплоть до десяти метров. При этом увеличение длины поглощения света WLS осуществляется за счёт его значительных потерь.

Нами использовались маски [10], которые располагались между сцинтилляторами и WLS. Однако позже были применены клинообразные полосы из чёрной бумаги, располагающиеся на противоположной от сцинтилляторов стороне световода и обращённые основанием к ФЭУ. Эти клинья наклеивались на алюминизированный майлар, которым был обтянут п-образный короб. Вместе с зеркалом, расположенным на противоположном от фотоумножителя конце WLS, клинья позволили увеличить эффективную длину поглощения света до ~ 5 метров. Более тщательным подбором формы полос можно добиться высокой линейности WLS на всей его длине, за исключением ближайших к ФЭУ 20-30 см.

Особое внимание обращалось на линейность характеристики WLS на его первых 10 см. Как будет показано ниже, эта однородность сильно влияет на отношение e/h при его измерении на пучках электронов.

Торец WLS, обращенный к фотоумножителю, нагревался и сворачивался в трубку с максимальным диаметром 20 мм. Однако в ходе эксплуатации модулей с такими WLS была выявлена их заметная долговременная нестабильность, связанная с ухудшением прозрачности свернутого конца со временем. Эти изменения характерны для ориентированного ПММА из-за возникновения внутренней остаточной напряженности и ухудшения прозрачности при даже незначительном перегреве при формовке.

В связи с этим мы отказались от описанной выше технологии и обрезали конец WLS под размер фотоумножителя, как это показано на рис. 24. При этом количество света уменьшилось в ≈ 2 раза, что практически не повлияло на характеристики калориметра. Такая форма WLS к тому же значительно уменьшила количество черенковского света, образуемого в световоде вытекающими из модуля заряженными частицами ливня.

Каждый WLS перед установкой в модуль проверялся на автоматизированном стенде. Средняя величина длины поглощения света в WLS с клином при измерении ~ 100 штук составила ~ 5 м.

Конструкция модуля позволяет менять WLS в случае необходимости без разбора всего калориметра. При этом проведение повторной калибровки не требуется, так как сами модули отличаются друг от друга не более чем на 5%, а WLS со своим ФЭУ может быть откалиброван в другом модуле.

⁷ Akesson I. et al. Preprint CERN-EP/85-806.-CERN.1985.

5.3. Система контроля и мониторирования

Для контроля стабильности системы мониторирования детекторов эксперимента НЕПТУН на светодиодах предполагалось использовать световые источники на основе радиоактивных изотопов, внедренных в неорганические сцинтилляторы. Однако существовавшие световые источники на основе известных сцинтилляционных материалов обладали плохим энергетическим разрешением, нелинейностью светового выхода при регистрации α -частиц разных энергий, неудовлетворительными физико-химическими свойствами используемых сцинтилляторов и большими размерами.

Наилучшие результаты были достигнуты при использовании кристаллов NaI(Tl) и CsI(Tl). Однако большое время высвечивания этих сцинтилляторов (230 и 1000 нс соответственно) по сравнению с временем высвечивания детекторов на основе органических сцинтилляторов требует либо использования дополнительного измерительного канала, либо увеличения длительности линейных ворот в преобразователе амплитуда/код, что существенно ухудшает временное разрешение детектора. Кроме того, радиоактивный изотоп в такие источники вводится в объём кристаллов при их выращивании, что сильно ухудшает энергетическое разрешение для α -частиц. Нанесение изотопов на поверхности этих кристаллов затруднено из-за их гигроскопичности.

Для эксперимента НЕПТУН были разработаны и изготовлены световые источники, в которых в качестве сцинтилляторов использовались кристаллы YAlO₃:Ce⁸. Его основные характеристики приведены в табл. 3 вместе с характеристиками CsI(Tl)-кристалла.

Конструкция светового источника, изготовленного на базе указанного сцинтиллятора, приведена на рис. 25. В центр кристалла размером 3 x 3 x 0,15 мм³ наносился микроисточник (²³⁸Pu, ²⁴¹Am или один из изотопов Th) с активностью 50÷200 Бк, после чего кристалл упаковывался во фторопластовый или алюминиевый корпус. Выбор изотопа ²³⁸Pu был обусловлен отсутствием в его излучении γ -компоненты, являющейся фоном.

Таблица 3.

Характеристика	Сцинтиллятор	
	YAlO ₃ :Ce	CsI(Tl)
Длина волны люминисценции, нм	374	565
Время высвечивания, нс	28	1000
Показатель преломления	1,93	1,8
Плотность, г/см ³	5,55	4,51
Световой выход относительно NaI(Tl), %	40	45
Гигроскопичность	Нет	Слабая
Температурный коэффициент, %К	0,39	0,24 ÷ 0,47

Световой источник крепится непосредственно на светочувствительную поверхность фотоприемника. На рис. 26 представлен амплитудный спектр световых источников с ²³⁸Pu-изотопом, на рис. 27 - с изотопом ²³⁹Th.

⁸ Baryshevsky V.G. et al.//Nucl.Instr.Meth. 1991. V.B58. P.291.

Высокое энергетическое разрешение источника при регистрации α -частиц ($\sigma_E/E=2\text{-}3\%$) и малое время высвечивания монокристалла $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ позволяют значительно сократить время, необходимое для набора статистики при мониторировании детекторов. Так, при активности источника 50 Бк и значении $\sigma \approx 3\%$ точность контроля энергетической шкалы 0,1% достигается за время порядка нескольких минут.

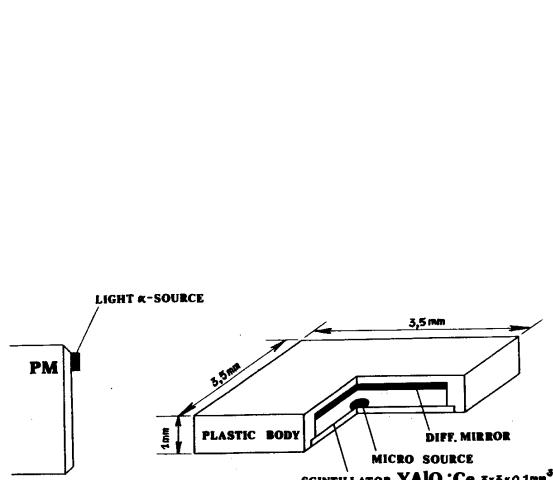


Рис. 25. Конструкция светового источника.

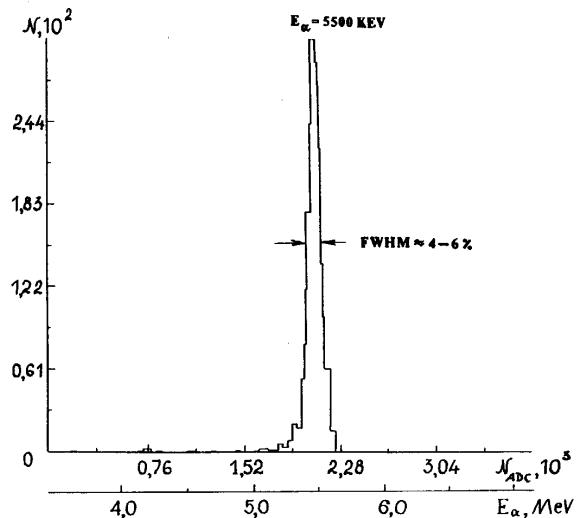


Рис. 26. Амплитудный спектр источника с ^{238}Pu -изотопом.

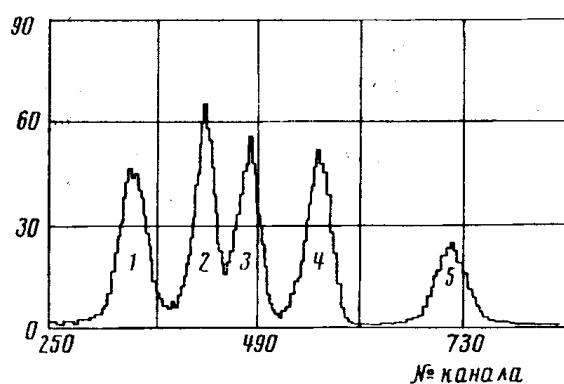


Рис. 27. Амплитудный спектр источника с ^{233}Th .

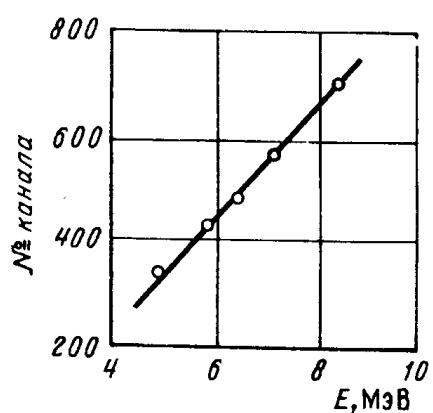


Рис. 28. Зависимость световыххода источника от энергии α -частиц.

Сцинтиллятор $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ обладает большим световым выходом, в одном импульсе регистрируется 2-2,5 тыс. фотоэлектронов (ФЭУ XP2020Q) и высокой линейностью светового выхода при регистрации α -частиц разных энергий. На рис. 28 приведена зависимость положения максимумов спектров одного из изотопов Th, имеющего пять α -линий, от энергии α -частиц. Отклонение от прямой, проведенной по пяти точкам, не превышает $\pm 3\%$. При этом импульс с ФЭУ для α -частиц с $E_\alpha = 8376$ кэВ эквивалентен

импульсу с модуля адронного калориметра при регистрации им частиц с энергией около 150 ГэВ.

Описанные световые источники были разработаны автором для адронного и электромагнитных калориметров эксперимента НЕПТУН. При этом источники устанавливаются на каждый модуль адронного калориметра и на одну из 16 ячеек супермодуля электромагнитного калориметра, имеющего автономную систему мониторирования на светодиодах. Сигналы от световых источников регистрируются между циклами ускорителя. Триггером служит сумма сигналов со всех модулей (используются выходы с последних динодов ФЭУ).

Разработанные световые источники технологичны в изготовлении и имеют малый разброс параметров. В партии из 600 штук разброс амплитуд импульсов составлял около 10% при значении $\sigma_E/E = (3 \pm 0,4)\%$.

В работе [4] нами изучалось поведение данных источников в магнитном поле до 10 кГ. Изменения световогохода и ухудшения энергетического разрешения в пределах ошибок (несколько процентов) обнаружено не было (рис. 29, 30).

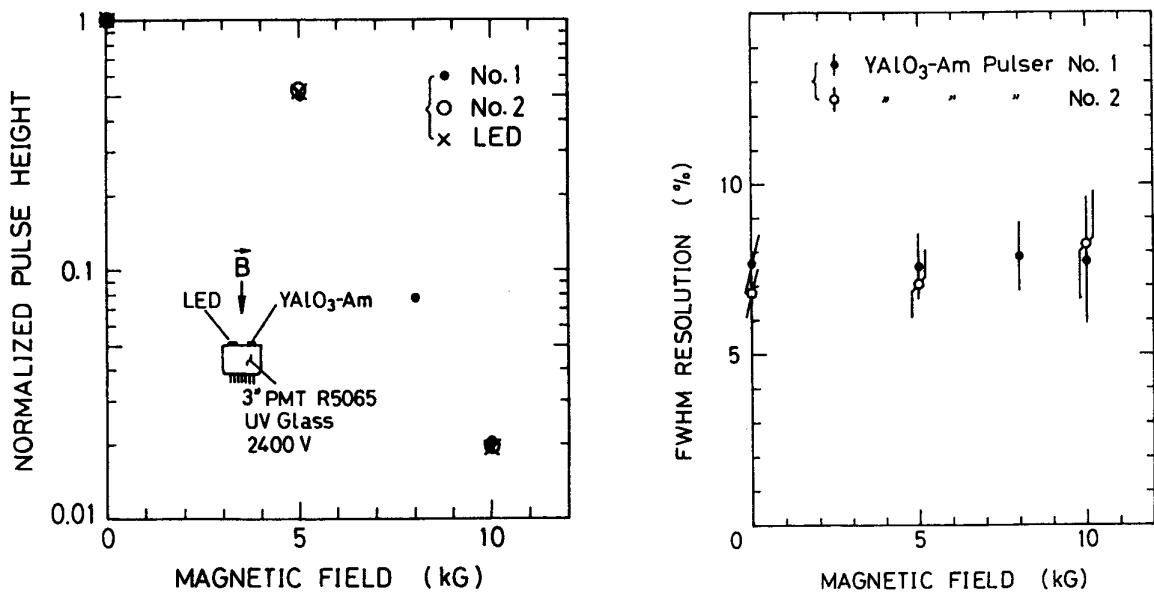


Рис. 29. Зависимость световогохода источника от магнитного поля.

Рис. 30. Влияние магнитного поля на энергетическое разрешение.

Кроме этого, адронный калориметр имеет общую систему мониторирования на светодиодах, свет от которых разводится органической фибероптикой на каждый модуль. Для этого в передней стальной пластине модуля имеется разъём для фиксации фибероптики.

В калориметре используются широко известные фотоумножители ФЭУ 84-3. В данной конструкции они помещены в двойной магнитный экран, состоящий из пермаллоя и стального стакана толщиной 3 мм. Такое экранирование позволяет обеспечить работу детектора в магнитных полях до 100 Гаусс.

5.4. Измерения на пучках

Схема измерений

Измерения характеристик макета адронного калориметра, состоящего из 30 модулей (матрица 5 x 6 модулей), проводились на пучках протонов с энергией 70 ГэВ, выведенных из ускорителя с помощью изогнутого кристалла кремния, и π^- -мезонов с энергией 39 ГэВ. Для измерения отношения e/h использовался пучок чистых электронов с энергией 26,6 ГэВ.

Матрица модулей помещалась на подвижную платформу, позволяющую с точностью ≈ 1 мм по обеим координатам устанавливать в пучок каждый из них.

Калибровка и измерение отношения e/h

Калибровка макета проводилась путём установки каждого модуля в пучок. После набора ≈ 10 тысяч событий спектр, полученный с каждого модуля, фитировался, при этом положение его максимума использовалось в качестве калибровочного коэффициента.

На рис. 31 представлены спектры с одиночного модуля, полученные на чистом пучке μ^- -мезонов (рис. 31а) и в обогащенном мюонами пучке π^- -мезонов (рис. 31б). По ним можно определить, какая выделенная энергия соответствует μ^- -мезону. При этом следует учесть, что в одном модуле калориметра поглощается только около 60% энергии адрона. При измерениях отношений сигналов мюонов и адронов была выявлена довольно существенная зависимость этого отношения от длины поглощения света в WLS. При использовании описанного выше клина из чёрной бумаги энергия, выделяемая μ^- -мезоном в модуле, соответствует $\approx 3,5$ ГэВ.

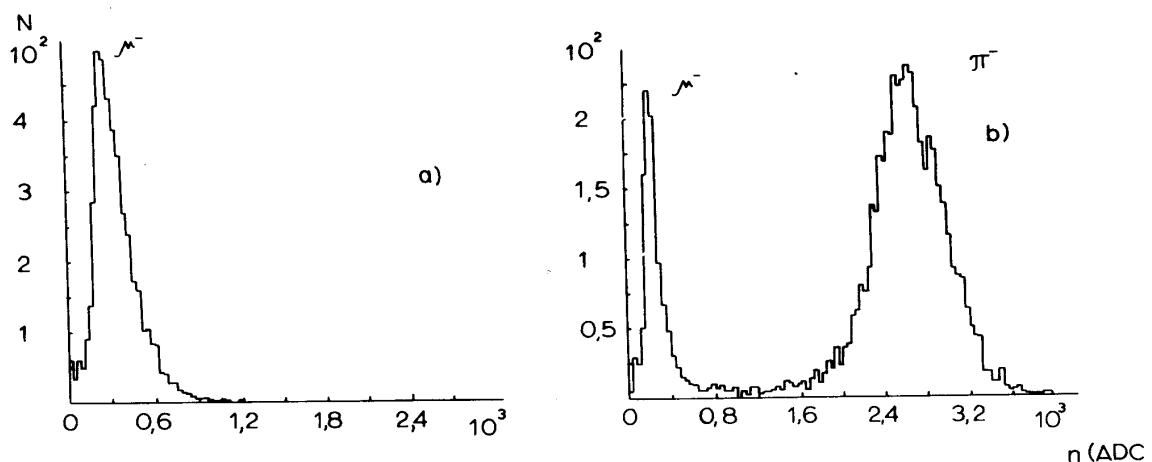


Рис. 31. Спектры сигналов с одиночного модуля.

- а) на чистом пучке μ^- -мезонов;
- б) на обогащённом μ^- -мезонами пучке π^- -мезонов с энергией ≈ 40 ГэВ.

Измерение однородности калориметра

Как отмечалось выше, наиболее существенным недостатком детекторов типа сандвич с полосковым сместителем спектра является их неоднородность, связанная с наличием WLS. Так называемые "горячие зоны" объясняются, во-первых, отсутствием материала - поглотителя в месте расположения WLS и, во-вторых, образованием в нём черенковского света заряженными частицами ливня. Для уменьшения этих эффектов нами использовался WLS толщиной 2 мм. При этом щель, оставляемая для него в модуле, не превышала 2,5 мм.

Количество черенковского света, которое, естественно, также зависит от толщины WLS, может быть уменьшено путём введения гасящих ультрафиолет добавок в объём световода.

На рис. 32 приведены результаты измерений однородности детектора при двух углах падения адронов 0° и 3° . На этом же рисунке представлены зависимости энергетического разрешения при тех же значениях углов. Видно, что при 0° однородность детектора является типичной для детекторов подобного типа и определяется как вкладом черенковского света (небольшой подъём в районе расположения WLS), так и наличием щели. При повороте на угол 3° однородность заметно улучшается, и в нашем случае неоднородность не превышает $\pm 5\%$. При наличии небольшого угла не происходит также резких скачков в энергетическом разрешении калориметра.

Проведенные измерения зависимости количества черенковского света от угла падения частицы показали, что при углах $\approx 3^\circ$ оно уменьшается в ~ 2 раза.

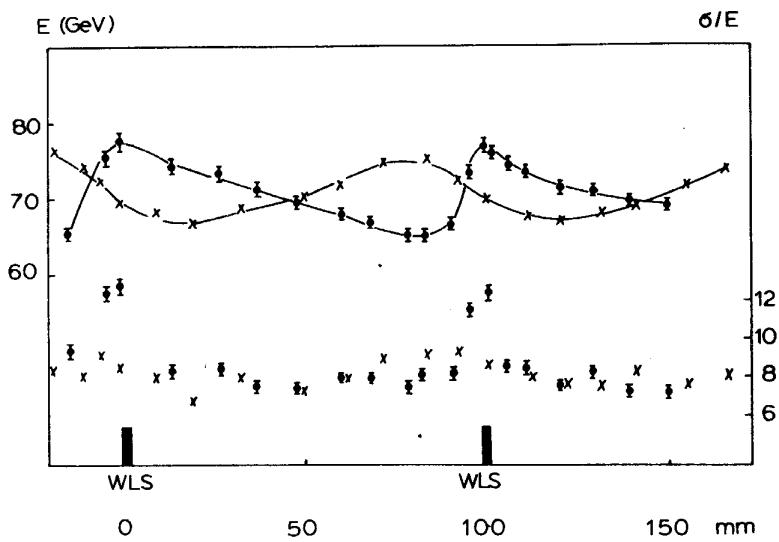


Рис. 32. Однородность калориметра и энергетическое разрешение в зависимости от угла падения частицы: ● - 0° , x - 3° .

Вертикальное расположение WLS в калориметре позволяет повернуть его на несколько градусов относительно оси пучка ускорителя, заметно улучшив тем самым однородность детектора в целом.

Энергетическое разрешение

Энергетическое разрешение калориметра измерялось при двух энергиях адронов: протонов с энергией 70 ГэВ и π^- -мезонов с энергией 39 ГэВ.

50 модулей описываемого калориметра были поставлены в CERN для эксперимента по поиску кварк-глюонной плазмы в ион-ядерных взаимодействиях (WA-94). Калориметр использовался в качестве beam-dump детектора и предназначался для понижения уровня фона во взаимодействиях ионов свинца со свинцом. Калориметр проработал в эксперименте в течение 3 лет в условиях больших радиационных нагрузок.

На рис. 33а представлен энергетический спектр, представляющий собой сумму сигналов с 30 модулями при облучении его протонами с энергией 70 ГэВ. Спектр имеет симметричную форму и хорошо описывается распределением Гаусса, что в свою очередь свидетельствует о наличии компенсации. На рис. 33б представлен спектр с калориметром при его облучении ионами свинца с энергией 160 ГэВ/нуклон. Суммарная энергия была более 32 ТэВ. Энергетическое разрешение практически полностью определяется постоянным членом. Структура в левой части спектра связана с регистрацией осколков ионов свинца, провзаимодействовавших в веществе перед калориметром.

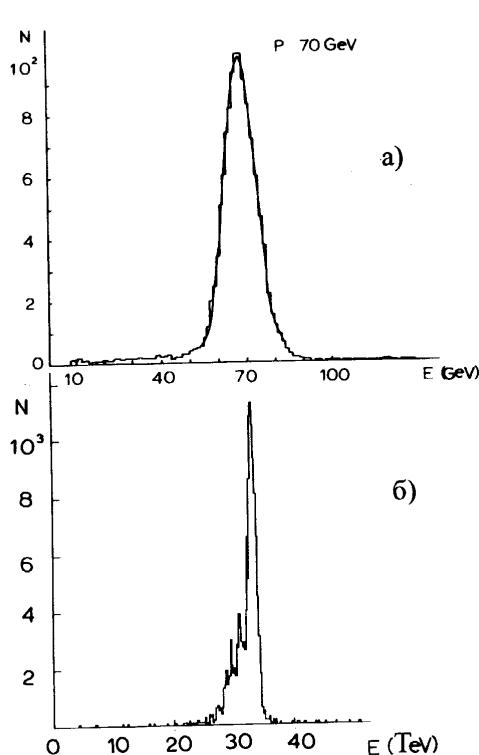


Рис. 33. Суммарные спектры сигналов калориметра
а) - при облучении его протонами с энергией
70 ГэВ,
б) - при облучении в CERN ионами свинца.

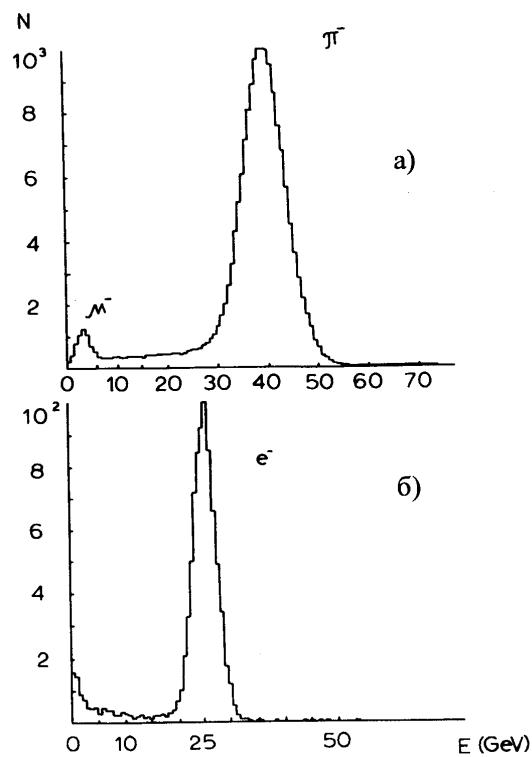


Рис. 34. Суммарные спектры сигналов калориметра при облучении его π^- -мезонами с энергией 39 ГэВ (а) и электронами с энергией 26,6 ГэВ (б).

На рис. 34а приведен спектр, полученный на пучке π^- -мезонов с энергией 39 ГэВ. После фитирования спектров распределением Гаусса были получены следующие значения энергетических разрешений:

$$\begin{aligned}\sigma/E &= 6,8\% \text{ - для } 70 \text{ ГэВ протонов,} \\ \sigma/E &= 9,5\% \text{ - для } 39 \text{ ГэВ } \pi^- \text{-мезонов.}\end{aligned}$$

На рис. 35 эти данные представлены вместе с характеристиками наиболее известных адронных калориметров. Пунктирная линия представляет собой зависимость

$$\sigma/E = a/\sqrt{E} \oplus b, \quad (6)$$

где $a \approx 57\%$; E – измеряется в ГэВ; b равно нулю.

Относительно лучшее энергетическое разрешение при 70 ГэВ объясняется, по-видимому, тем, что для протона эффективная толщина калориметра на 1-2 ядерных длины больше, чем для π^- -мезона, из-за разницы в сечениях взаимодействия.

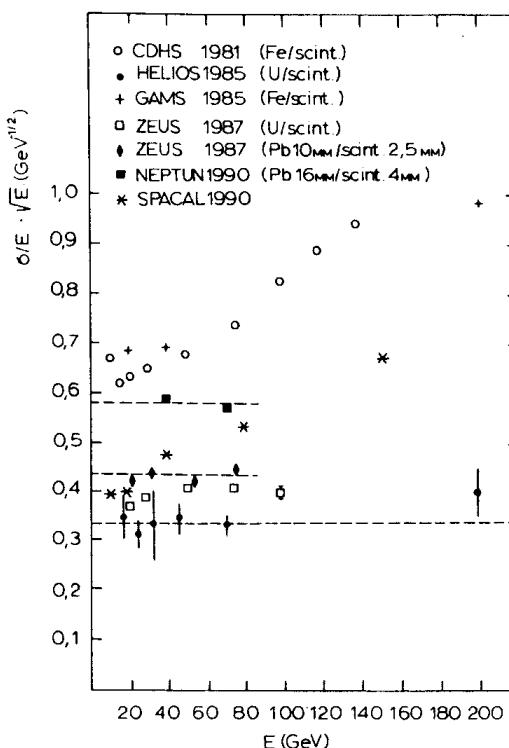


Рис. 35. Энергетическое разрешение некоторых известных адронных калориметров.

Как известно, величина b в значительной мере определяется прозрачностью WLS или в случае калориметра типа SPACAL прозрачностью сцинтиллирующих волокон. Поскольку эффективная длина поглощения света нами доведена до ≈ 5 м, вклад в постоянный член вносит в основном аппаратурная функция и прежде всего

шумы электроники, особенно заметные при суммировании большого числа каналов АЦП, неточность в измерениях калибровочных коэффициентов, погрешности системы мониторирования.

Энергетическое разрешение адронных калориметров σ_t определяется следующей формулой

$$\sigma_t^2 = \sigma_{\text{intr}}^2 + \sigma_{\text{samp}}^2 + \sigma_{\text{phot}}^2 + \sigma_{\text{WLS}}^2,$$

где σ_{intr} - флюктуации невидимой энергии; σ_{samp} - флюктуации регистрируемой энергии; σ_{phot} - флюктуации числа фотоэлектронов; σ_{WLS} - флюктуации переизлученного света, связанные с флюктуациями продольного развития ливня.

В работе ⁹ были определены вклады в энергетическое разрешение $\sigma_{\text{intr}} \approx 13\%/\sqrt{E}$ и $\sigma_{\text{samp}} \approx 40\%/\sqrt{E}$ для адронного калориметра на свинце толщиной 10 мм. При выбранной нами толщине поглотителя 16 мм, $\sigma_{\text{samp}} \approx 50\%/\sqrt{E}$.

Измеренное число фотоэлектронов/ГэВ составляет около 20. Если предположить, что ядерный ливень флюктуирует в пределах одной длины ядерного взаимодействия (20 см), и учитывая длину поглощения света в WLS, можно оценить ожидаемое энергетическое разрешение калориметра, которое равно:

$$\sigma/E \approx 55\% / \sqrt{E},$$

что близко к полученному нами значению.

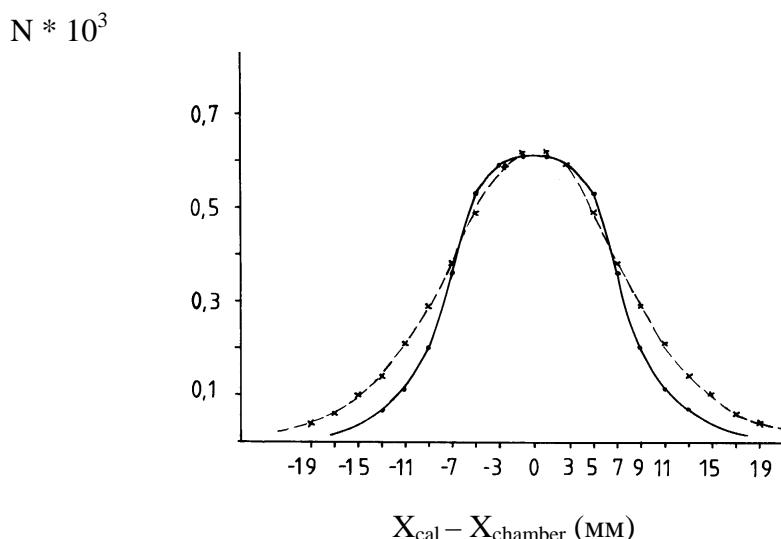


Рис. 36. Точность измерения координат адронного ливня, измеренная на макете адронного калориметра при энергии 70 ГэВ.
Сплошная кривая – угол падения частиц 0°, пунктирная кривая – 3°.

Координатное разрешение данного детектора (рис. 36) слабее зависит от точки попадания адрона, чем в детекторах с большими поперечными размерами модуля, и

⁹ Drews G. et al.//Nucl.Instr.Meth. 1990. V.A290. P.335.

составляет $\sigma_x \approx 5$ мм при попадании адрона между ячейками и 8 мм при попадании адрона в центр модуля.

Измерение отношения e/h

Для определения отношения e/h были проведены измерения на пучке электронов с энергией 26,6 ГэВ. При этом электронами облучались 8 центральных модулей макета.

Как уже отмечалось выше, для правильного измерения этого отношения необходимо обеспечить высокую однородность светосбора с каждой сцинтилляционной пластины, поскольку электромагнитный ливень развивается в первых 3 слоях адронного калориметра. В реальной же ситуации нас интересует отношение электронной и адронной компонент в адронном ливне, который развивается на расстоянии 40-60 см от начала модуля.

На рис. 34б представлен энергетический спектр калориметра, полученный на пучке электронов с энергией 26,6 ГэВ.

С учётом отношения энергий π^+ -мезонов и электронов и положения максимумов спектров были получены величины e/h для каждого из облученных электронами модулей. Среднее значение при этом получено равным

$$e/h = 1,01 \pm 0,03.$$

Разрешение по энергии для электронов в данном детекторе полностью определяется толщиной свинцовой пластины ($3 X_0$) и равно $\sigma/E \approx 40\%/\sqrt{E}$.

Проведенные на пучках частиц с энергиями до нескольких ТэВ измерения показали, что характеристики предложенного автором адронного калориметра являются уникальными. Небольшие поперечные сечения модулей предоставляют возможность измерять координаты адронов с точностью в несколько миллиметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты диссертации.

1. Автором было обосновано и предложено применение новых тяжёлых монокристаллов для прецизионной электромагнитной калориметрии. Возможности этих кристаллов были всесторонне изучены.

- Создан и изучен на пучках частиц макет электромагнитного калориметра на кристалле $PbWO_4$. Показано, что сегодня этот кристалл является наилучшим кандидатом для создания электромагнитных калориметров для высоких энергий. На основе данного кристалла при участии автора создаются два крупнейших электромагнитных калориметра, предназначенных для работы на LHC в экспериментах ALICE (35 тысяч кристаллов) и CMS (80 тысяч кристаллов).

- Исследованы прототипы черенковских спектрометров полного поглощения на кристаллах $Gd_3Ga_5O_{12}$ и $NaBi(WO_4)_2$. Показано, что данные материалы могут использоваться в электромагнитной калориметрии и имеют значительные преимущества перед свинцовым стеклом. Высокая радиационная стойкость и малая радиационная длина этих кристаллов позволяют создавать компактные детекторы, обладающие высоким энергетическим и пространственным разрешениями.

Проведённые исследования макетов спектрометров на основе этих кристаллов открывают новые возможности в регистрации γ -квантов и электронов высокой энергии.

2. Разработанные и изученные калориметры на основе сандвича вольфрам-сцинтиллятор могут быть относительно дешёвой альтернативой спектрометров на тяжёлых кристаллах. Обладая несколько худшими энергетическим разрешением и однородностью, детекторы на основе сандвича вольфрам-сцинтиллятор могут использоваться в экспериментах, где прежде всего необходимо высокое пространственное разрешение.

3. Разработан, создан и исследован в пучках частиц компенсированный модульный свинцовый адронный калориметр для экспериментов при сверхвысоких энергиях. Технология изготовления его модулей такова, что позволяет создавать детекторы любой необходимой толщины.

Проведённые исследования характеристик данного детектора на пучках частиц и ионов свинца показали, что он является компенсированным и измеряет координаты и энергию частиц с высокой точностью. В настоящий момент изготовлено около 500 модулей калориметра, которые используются в эксперименте РАМПЕКС на У-70 в ИФВЭ и в эксперименте WA-94 на SPS в CERN.

4. В ходе разработки системы мониторирования адронного калориметра были обоснованы и созданы реперные импульсные источники света на базе кристалла $YAlO_3:Ce$ с нанесёнными на него радиоактивными изотопами. Этот источник позволяет контролировать коэффициенты усиления любых фотодетекторов и линейность электроники. За изобретение источника с использованием кристалла $YAlO_3:Ce$ получено авторское свидетельство №1826763.

Изготовлено более 3000 источников, которые используются в экспериментах на ускорителях ИФВЭ, CERN и BNL.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.A.Kachanov. Study of characteristics of real-size $PbWO_4$ crystal cells for precise EM-calorimeters to be used at LHC energies. Report to the CRYSTAL 2000 Workshop, Chamonix, 1992.

2. V.A.Kachanov. 26 GeV electron beam test results of two EM-calorimeter prototypes made of heavy crystals GGG and NBW. Report to the CRYSTAL 2000 Workshop, Chamonix, 1992.
3. О.В.Буянов, А.А.Фёдоров, В.Н.Гришин, В.Б.Городничев, В.А.Качанов, В.Ю.Ходырев, М.В.Коржик, В.А.Медведев, В.В.Мочалов, Ю.Д.Прокошкин, В.В.Рыкалин, П.М.Шагин, П.А.Семёнов, А.В.Синьговский, В.Л.Соловьянов, М.Н.Уханов. Исследование прототипа электромагнитного калориметра, изготовленного из кристаллов PbWO₄, на пучках частиц. Препринт ИФВЭ 93-144, 1-12, Серпухов, 1993.
Beam studies of e.m.calorimeter prototype built of heavy fast-scintillating PbWO₄ crystals. ALICE/93-25, CERN, 1993.
4. V.A.Kachanov, M.Kobayashi, T.Shinikawa, T.Sato, S.Sugimoto, M.V.Korzhik, A.A.Fyodorov. YAlO₃:Ce-Am light pulsers as a gain monitor for undoped CsI detectors in a magnetic field. KEK preprint 93-32, May 1993, H, 1-19; NIM, A337, 355-361, 1994.
5. V.G.Baryshevsky, B.A.Zadneprovsky, M.V.Korzhik, V.A.Kachanov, P.V.Nefedov, V.A.Nefedov, V.B.Pavlenko, V.L.Solovianov, A.A.Fyodorov, V.Yu.Hodyrev. NaBi(WO₄)₂ – new scintillation single crystals for electromagnetic calorimeters. Письма в ЖЭТФ, v.18, p.17-22, 1992.
6. В.А.Качанов, М.В.Коржик, А.С.Лобко, В.И.Мороз, В.А.Смирнова, В.Л.Соловьянов, А.Ф.Новгородов, В.В.Рыкалин, Б.А.Хачатуров, А.А.Фёдоров, В.Ю.Ходырев. Реперные световые источники для мониторирования многоканальных электромагнитных и адронных калориметров. ПТЭ, №1, с. 99-102, 1993.
7. V.A.Kachanov, V.V.Rykalin, V.L.Solovyanov, V.Yu.Hodyrev, M.V.Korzhik, V.I.Moroz, A.S.Lobko, A.A.Fyodorov, A.F.Novgorodov, B.A.Khachaturov, S.A.Smirnova. Light source for energy stabilization of calorimetric detectors based on photodetectors. NIM, A314, 215-218, 1992.
8. V.A.Kachanov. Beam studies of EM calorimeter prototype built of PbWO₄ crystals, reported to the IV Int.Conf.on Calorimetry in High Energy. Sept.15-19, 1993, Isola Elba, Italy.
9. O.V.Buyanov, R.Chipaux, A.A.Fyodorov, V.A.Kachanov, V.Yu.Khodyrev, M.V.Korzhik, J.L.Faure, J.P.Peigneux, M.Poulet, Yu.D.Prokoshkin, P.Rebourgeard, V.V.Rykalin, P.Shagin, P.A.Semenov, A.V.Singovsky, V.L.Solovianov. A first electromagnetic calorimeter prototype of PbWO₄ crystals. NIM, A349, 62-69, 1994; Preprint LAPP-EXP-94.06, 1-28, March 1994.
10. Г.А.Алексеев, В.Д.Апокин, О.В.Буянов, В.Н.Гришин, В.А.Качанов, В.А.Медведев, Н.Г.Минаев, В.В.Мочалов, В.В.Рыкалин, П.А.Семёнов, В.Л.Соловьянов, С.М.Стёпушкин, М.Н.Уханов, Б.В.Чуйко, В.Ю.Ходырев. Изучение характеристик компенсированного свинцового адронного калориметра на пучках адронов и электронов. Препринт ИФВЭ 92-36, Серпухов, 1992.

11. Г.А.Алексеев, В.Д.Апокин, О.В.Буянов, В.Н.Гришин, В.А.Качанов, Ю.А.Матуленко, В.А.Медведев, В.В.Мочалов, А.И.Мысник, Д.И.Паталаха, В.В.Рыкалин, В.Л.Соловьянов, С.М.Стёпушкин, М.Н.Уханов, В.Ю.Ходырев. Компенсированный свинцовый адронный калориметр эксперимента НЕПТУН. Препринт ИФВЭ 90-157, Серпухов, 1990.
12. V.A.Kachanov, Yu.D.Prokoshkin, A.V.Singovsky, V.G.Baryshevsky, M.V.Korzhik, J.P.Peigneux, M.Poulet, A.A.Fyodorov. Properties and beam tests of PbWO₄ crystals. Preprint LAPP-EXP-93.08, 1-22, October 1993; Proc. of IEEE 93, Nuclear Science Symposium, November 1993, San Francisco, California, USA.
13. В.А.Качанов, Б.А.Хачатуров, М.В.Коржик. Сцинтиляционный детектор с реперным источником. Государственный реестр изобретений СССР, Авторское Свидетельство № 1826763, 13 октября 1992 г.
14. J.P.Peigneux, M.Schneegans, E.Bateman, S.Burge, D.Cockerill, J.Connolly, B.Smith, R.Stephenson, E.Auffray, D.Barney, I.Dafinei, P.Lecoq, T.S.Virdee, J.L.Faure, A.Givernaud, E.Locci, P.Verrecchia, J.Barney, W.Cameron, D.Clark, D.Miller, C.Seez, M.Williams, R.Rusack, J.Bourotte, M.Haguenauer, M.Korzhik, G.Alexeev, V.Kachanov, M.Oukhanov, P.Shagin, A.Singovskii, P.Denes, T.Flugel, D.Renker. Results from tests on matrices of lead tungstate crystals using high-energy beams. NIM, A378, 410-426, 1996.
15. G.A.Alexeev, F.Binon, A.V.Dolgopolov, S.V.Donskov, A.A.Fedorov, V.A.Kachanov, V.Yu.Khodyrev, M.V.Korzhik, V.A.Medvedev, O.V.Missevich, J.P.Peigneux, Yu.D.Prokoshkin, P.M.Shagin, A.V.Singovskii, V.L.Solovianov, S.M.Stepoushkin, V.P.Sugonyaev, J.P.Vialle. Beam test results of a PbWO₄ crystal calorimeter prototype. LAPP-EXP-95-04, Apr 1995, 13 pp.; NIM, A364, 307-310, 1995.
16. A.Fedorov, M.Korzhik, O.Missevich, V.Pavlenko, V.Kachanov, A.Singovskii, A.N.Annenkov, V.A.Ligun, J.P.Peigneux, J.P.Vialle, J.L.Faure, F.Binon. Further progress in lead tungstate crystals. LAPP-EXP-94-24, Dec 1994, 5 pp. Presented at IEEE 1994 Nuclear Science symposium and Medical Imaging Conference, Norfolk, VA, 30 Oct – 5 Nov 1994.
17. A.Fedorov, M.Korzhik, O.Missevich, V.Pavlenko, V.Kachanov, A.Singovskii, A.N.Annenkov, V.A.Ligun, J.P.Peigneux, J.P.Vialle, J.L.Faure, F.Binon. Progress in PbWO₄ scintillating crystal. LAPP-EXP-94-25, Dec 1994, 24 pp.

Рукопись поступила 11 мая 1999 г.